

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CLARISSA OLIVEIRA DIAS

**DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS
NÃO SATURADOS**

CURITIBA
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CLARISSA OLIVEIRA DIAS

**DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS
NÃO SATURADOS**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Construção Civil, área de
concentração Geotecnia,
Departamento de Construção Civil,
Setor de Tecnologia, Universidade
Federal do Paraná, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia e Construção
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo
Dell'Avanzi.

CURITIBA
2012

Dias, Clarissa Oliveira

Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados /
Clarissa Oliveira Dias. – Curitiba, 2012.

227 f. : il.; graf., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e
Construção Civil.

Orientador: Eduardo Dell'Avanzi

1. Solos -- Permeabilidade. I. Dell'Avanzi, Eduardo. II. Título.

CDD 624.15136

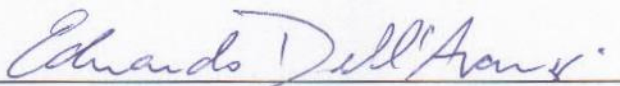
TERMO DE APROVAÇÃO

CLARISSA OLIVEIRA DIAS

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS NÃO SATURADOS

Dissertação aprovada com requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:


Orientador:



Prof. Dr. Eduardo Dell'Avanzi

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Construção Civil, UFPR

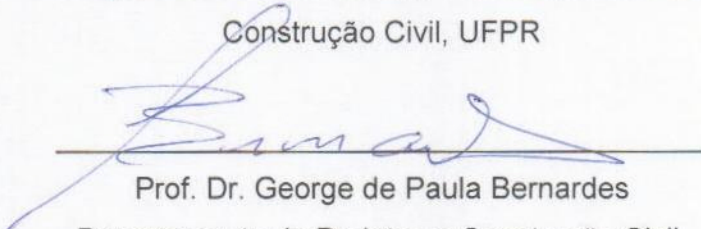
Membro:



Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Construção Civil, UFPR

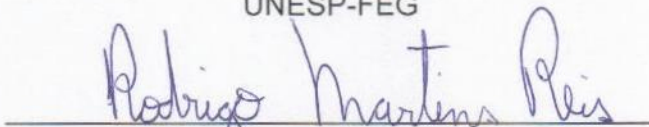
Membro:



Prof. Dr. George de Paula Bernardes

Departamento de Projetos e Construção Civil,
UNESP-FEG

Membro:



Prof. Dr. Rodrigo Martins Reis

Laboratório de Engenharia Civil, UENF-RJ

Curitiba, 17 de maio de 2012

Aos meus pais Pedro e Marilza Dias, minha irmã Camila e ao meu noivo Héliô, pelo estímulo e compreensão que possibilitaram a conclusão desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Eduardo Dell’Avanzi pela paciência e sabedoria na condução da orientação desta dissertação, bem como a consideração de ter aceito a orientação de minha dissertação e a confiança em mim depositada.

Aos alunos, professores e funcionários apoiadores da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em Campos dos Goytacazes, especialmente ao Prof. Dr. Rodrigo Martins Reis, que me acolheram com muito carinho, quando da realização dos ensaios no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) do Centro de Ciência e Tecnologia.

Agradeço aos meus amigos, que com sua amizade contribuíram no estímulo para a conclusão deste trabalho, em especial a Daniele Rodrigues, que dedicou seu tempo no auxílio aos ensaios realizados no Laboratório de Geotecnia e Materiais (LAGEMA) da Universidade Federal do Paraná. Aos companheiros de trabalho, especialmente a Marcela Ruiz, pela compreensão e ajuda, essenciais para finalização deste estudo.

Agradeço a minha família, meus pais Marilza e Pedro Dias, pelo exemplo de conduta profissional e ética, que durante o período de conclusão deste trabalho foram compreensivos e incentivadores e, minha irmã Camila pela ajuda nos momentos finais do trabalho.

Agradeço ao meu noivo Hélio que durante a realização deste trabalho, sempre me apoiou, inclusive ajudando diretamente nos exaustivos ensaios de laboratório. Agradeço-lhe, com muito amor, pelo companheirismo, apoio e compreensão incondicional, sem as quais não seria possível concluir esta dissertação.

RESUMO

Na quantificação do fluxo em meio poroso a condutividade hidráulica aparece como variável essencial. As dificuldades impostas para determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados, relacionadas ao tempo, custo e complexidade de ensaios laboratoriais, levam os engenheiros a utilizar simplificações para estimativa desta variável através de modelos matemáticos, os quais requerem validação, ou, de propriedades saturadas do solo. O presente estudo teve como objetivo avaliar diferentes métodos de determinação da condutividade hidráulica não saturada. Foram executados ensaios através de um método em centrífuga de pequena escala e de um método em permeâmetro com pressurização de ar no topo da amostra de solo para acelerar o fluxo de água, ambos transientes. Três solos foram testados em permeâmetro, sendo um grosso (areia) e dois finos (siltes). Os dois solos finos foram testados simultaneamente em centrífuga apresentando resultados satisfatórios para curva de retenção de umidade e função de condutividade hidráulica. Através dos ensaios em permeâmetro, verificou-se que a magnitude da condutividade hidráulica não varia significativamente com as diferentes formas de contabilização do gradiente hidráulico. Durante ensaio em permeâmetro, os perfis de umidade volumétrica e sucção ao longo do tempo indicaram que é válida a simplificação de gradiente hidráulico unitário na porção superior da amostra. A estimativa de condutividade hidráulica não saturada baseada nos ensaios em permeâmetro resultou em valores maiores de condutividade hidráulica quando comparados aos valores finais dos ensaios em centrífuga. Assim, conclui-se que a atuação de força centrípeta ou de pressão de ar para aceleração do fluxo induz comportamentos distintos no solo, levando a estimativas diferentes da condutividade hidráulica não saturada. Os resultados experimentais obtidos através de ensaio em centrífuga apresentaram comportamento mais próximo ao esperado e melhor ajuste aos modelos matemáticos analisados de Mualem-van Genuchten e de Gardner, além de tempo de ensaio significativamente menor.

Palavras-chave: função de condutividade hidráulica, solo não saturado, centrífuga, pressão de ar.

ABSTRACT

In the quantification of the flux in porous media the hydraulic conductivity is an essential variable. The difficulties imposed for the determination of the hydraulic conductivity of unsaturated soils, related to time, costs and complexity of laboratory tests cause engineers to simplify the estimate of this variable through mathematical models, that require validation, or saturated properties of the soil. This project's goal was to evaluate different methods of determination of unsaturated hydraulic conductivity. The tests consisted in the use of a small-scale centrifuge and a permeameter, with air pressurization on top of the soil specimen, to speed up the water flux. Both the tests were transients. Three kinds of soils were tested in permeameter, a granular soil (sand) and two fine grain soils (silts). The fine grain soils were simultaneously tested in centrifuge and showed satisfactory results for the soil water retention curve (SWRC) and hydraulic conductivity function. The permeameter tests proved that the magnitude of the hydraulic conductivity does not vary significantly with the different ways of hydraulic gradient evaluation. During the permeameter tests the volumetric moisture and suction profiles proved to be valid the simplification of unit hydraulic gradient in the upper portion of the soil specimen. The estimate of unsaturated hydraulic conductivity based on the permeameter tests resulted in higher values of hydraulic conductivity if compared to the final values presented in the centrifuge tests. Therefore, it is concluded that the centripetal force or the air pressure for the acceleration of the flux induces different behaviors in the soil, leading to different estimates of the unsaturated hydraulic conductivity. The experimental results obtained through the centrifuge tests seemed closer to the expected and better adjusted to the mathematical models of Mualem-van Genuchten and Gardner, and also the testing time was significantly shorter.

Keywords: hydraulic conductivity function, unsaturated soil, centrifuge, air pressure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Perfil de umidade (a) e poropressão (b) em solo de região de clima tropical ou subtropical.	32
Figura 2.2 – Exemplo de uma curva de retenção de umidade do solo.....	34
Figura 2.3 – Exemplo de curva de retenção de umidade para diferentes tipos de solo: (a) solo arenoso; (b) solo siltoso; (c) solo argiloso.....	35
Figura 2.4 – Variação da CRUS com o índice de vazios do solo.	36
Figura 2.5 – Histerese na curva de retenção de umidade do solo	37
Figura 2.6 – Esquema para ensaio de coluna drenante.....	39
Figura 2.7 – Disposição de papel filtro sobre amostra de solo para determinação da sucção: (a) total e (b) mátrica.	40
Figura 2.8 – Volume de controle infinitesimal para fluxo de água sob gravidade normal.	50
Figura 2.9 – Função de condutividade hidráulica para solo arenoso e argiloso.	54
Figura 2.10 – Curva de retenção de umidade do solo (<i>CRUS</i>) e curva de condutividade hidráulica (<i>FUNÇÃO-K</i>) com indicação da fronteira entre predomínio de transporte líquido e de vapor.....	56
Figura 2.11 – Permeâmetro centrífugo.....	58
Figura 2.12 – Fluxo através de um volume de controle em um modelo centrífugo.	59
Figura 2.13 - Fator de uniformidade em um modelo em centrífuga.....	61
Figura 2.14 - Curva de retenção de umidade (a) e de condutividade hidráulica (b) segundo equação de van Genuchten (1980).	66
Figura 2.15 – Perfis de sucção para fluxo em solo não saturado em um modelo em centrífuga.	76
Figura 2.16 – Influência do comprimento da amostra no perfil de sucção do modelo centrífugo.....	77
Figura 2.17 – Recipiente da centrífuga para o método IFC.....	79
Figura 2.18 – Seção transversal, perpendicular ao plano de rotação do aparato para fluxo não saturado.....	81
Figura 2.19 – Esquema geral do dispositivo usado para os ensaios em centrífuga por Dell'Avanzi (2004).	82

Figura 2.20 – Resultados obtidos por Dell’Avanzi (2006).....	83
Figura 2.21 – Equipamento desenvolvido por Zornberg e McCartney (2010)..	84
Figura 2.22 – Determinação de H_0 e t_{90} através do método gráfico de Taylor.	89
Figura 3.1 – Curva granulométrica para solo grosso.....	93
Figura 3.2 – Curva de retenção de umidade da areia de Paranaguá para processo de drenagem e umedecimento (densidade relativa de 30%).....	96
Figura 3.3 – Curva de retenção de umidade do solo arenoso com ajuste pelos modelos de van Genuchten e de Gardner (densidade relativa de 30%).	96
Figura 3.4 – Amostra de solo inicialmente seca para ensaio em coluna drenante – processo de umedecimento.	98
Figura 3.5 – Monitoramento da ascensão capilar em ensaio em coluna drenante – processo de umedecimento.	98
Figura 3.6 – Amostra de solo inicialmente seca para ensaio em coluna drenante – processo de drenagem.....	99
Figura 3.7 – Saturação gradual da amostra para ensaio em coluna drenante – processo de drenagem.....	99
Figura 3.8 – Início da drenagem livre em ensaio em coluna drenante.....	100
Figura 3.9 – Final da drenagem livre em ensaio em coluna drenante.....	100
Figura 3.10 – Curva de retenção de umidade da areia de Paranaguá para processo de drenagem e umedecimento (densidade relativa de 75%).....	102
Figura 3.11 – Curva de retenção de umidade do solo arenoso com ajuste pelos modelos de van Genuchten e de Gardner (densidade relativa de 75%).	102
Figura 3.12 – Curvas de retenção de umidade do solo arenoso com ajuste pelo modelo de van Genuchten para diferentes densidades relativas.	104
Figura 3.13 – Funções de condutividade hidráulica não saturadas para o solo arenoso segundo modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner.....	106
Figura 3.14 – Curva granulométrica para solo fino 1.....	107
Figura 3.15 – Curva de compactação do solo siltoso 1.....	108
Figura 3.16 – Curva de retenção de umidade do solo siltoso 1 em função da umidade volumétrica.	110
Figura 3.17 – Curva de retenção de umidade ajustada pelo modelo de van Genuchten para o solo siltoso 1.....	111

Figura 3.18 – Curva de retenção de umidade ajustada pelo modelo de Gardner para o solo siltoso 1.	111
Figura 3.19 – Configuração da célula de adensamento para ensaio de permeabilidade com carga variável.....	112
Figura 3.20 – Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica saturada para solo siltoso 1.	114
Figura 3.21 – Previsão das funções de condutividade hidráulica do silte 1 através dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner.	115
Figura 3.22 – Curva granulométrica para solo fino 2.....	116
Figura 3.23 – Disposição dos papéis filtro e rede de PVC sobre a mostra. ...	118
Figura 3.24 – Embalagem das amostras para equalização.	119
Figura 3.25 – Curva de retenção de umidade do solo siltoso 2 em função da umidade volumétrica.	120
Figura 3.26 – Curva de retenção de umidade ajustada pelos modelos de van Genuchten e de Gardner para o solo siltoso 2.	121
Figura 3.27 – Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica saturada para o solo siltoso 2.	123
Figura 3.28 – Previsão das funções de condutividade hidráulica do solo siltoso 2 através dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner.	124
Figura 3.29 – Configuração geral da centrífuga: (a) vista externa; (b) e (c) vista interna.	126
Figura 3.30 – Conjunto de PVC para colocação das amostras: anéis e cap..	126
Figura 3.31 – Configuração dos componentes internos da centrífuga.	127
Figura 3.32 – Discos cerâmicos.	128
Figura 3.33 – Perfis de sucção para diferentes velocidades angulares impostas (disco de 13 mm).....	129
Figura 3.34 – Amostras dos solos finos para ensaio em centrífuga: (a) solo siltoso 2; (b) solo siltoso 1; (c) amostras envolvidas em filme de PVC.....	131
Figura 3.35 – Saturação das amostras para ensaio em centrífuga.	132
Figura 3.36 – Conjunto de PVC: anel com amostra de solo, anel mais espesso com tecido fino na base e cap.....	133
Figura 3.37 – Disposição dos discos cerâmicos no interior dos recipientes da centrífuga: (a) disco de 50 mm no recipiente 2; (b) disco de 13 mm no recipiente 1.....	133

Figura 3.38 – Recipientes da centrífuga com as quatro amostras de solo.....	134
Figura 3.39 – Recipientes da centrífuga fechados com caps de alumínio.	134
Figura 3.40 – Pesagem do conjunto de PVC com amostra de solo.	135
Figura 3.41 – Exemplos de curva de volume da água em função do tempo para ensaio em centrífuga: (a) assíntota horizontal bem definida em gráfico $V \times \sqrt{t}$; (b) assíntota horizontal não definida em gráfico $V \times \sqrt{t}$; (c) análise através do gráfico $V \times t$ para mesma condição de (b).	139
Figura 3.42 – Variação do gradiente de sucção com a velocidade angular e com a região da amostra (a legenda indica a distância em relação ao centro da amostra a partir da qual foi calculado o gradiente de sucção).	141
Figura 3.43 – Configuração geral do permeâmetro.....	143
Figura 3.44 – Configuração do permeâmetro com pressurização no topo do solo, ensaio transiente.	144
Figura 3.45 – Porção superior do permeâmetro com conexão a linha de ar pressurizado.....	145
Figura 3.46 – Diferentes configurações para o sistema de controle de velocidade de descarga: (a) sem placa cerâmica (utilizado no presente estudo); (b) com uma placa cerâmica - um reservatório, (c) com duas placas cerâmicas - dois reservatórios.....	146
Figura 3.47 – Compressor.....	147
Figura 3.48 – Manômetros e válvula reguladora de pressão (Bellofram).	148
Figura 3.49 – Cilindro do corpo de prova.	149
Figura 3.50 – Reservatório inferior de alumínio fechado utilizado para aplicação de pressão para saturação da amostra.....	151
Figura 3.51 – Configuração do reservatório inferior para coleta de água.....	152
Figura 3.52 – Sonda de TDR.....	153
Figura 3.53 – Placa multiplexadora e MiniTrase conectados às sondas de TDR para obtenção das leituras.	153
Figura 3.54 – Sondas de TDR disposta ao longo da coluna de solo e vedadas com cola de silicone e fita adesiva impermeabilizante.	154
Figura 3.55 – Procedimento de calibração das sondas de TDR.	155
Figura 3.56 – Curva de calibração do TDR para umidade gravimétrica para areia de Paranaguá.....	155

Figura 3.57 – Curva de calibração do TDR para umidade gravimétrica para silte 1.	156
Figura 3.58 – Curva de calibração do TDR para umidade gravimétrica para silte 2.	156
Figura 3.59 – Curvas de calibração do TDR para umidade volumétrica.	157
Figura 3.60 – Compactação do solo siltoso 1 no permeâmetro: (a) primeira camada compactada com soquete; (b) instalação e compactação manual da sonda de TDR; (c) vedação externa da sonda de TDR com cola de silicone; (d) topo da coluna de solo de 25 cm ao final da compactação; (e) vedação externa das sondas de TDR com fita adesiva impermeabilizante; (f) adição de água ao topo da coluna de solo.	160
Figura 3.61 – Solo siltoso 2 compactado no cilindro do permeâmetro.	161
Figura 3.62 – Recipiente plástico de coleta de água com óleo a fim de evitar a evaporação da água de fluxo de saída para ensaios mais longos.	162
Figura 3.63 – Exemplo de curva de volume da água em função do tempo para ensaio em permeâmetro.	166
Figura 4.1 – Pontos experimentais da curva de retenção de umidade do solo obtidos em ensaio em centrífuga com o solo siltoso 1.	171
Figura 4.2 – Pontos experimentais da curva de retenção de umidade do solo obtidos em ensaio em centrífuga com o solo siltoso 2.	172
Figura 4.3 – Ajuste de van Genuchten aos dados experimentais obtidos em centrífuga e comparação com a curva obtida pelo método de papel filtro para o solo siltoso 1.	173
Figura 4.4 – Ajuste de van Genuchten aos dados experimentais obtidos em centrífuga e comparação com a curva obtida pelo método de papel filtro para o solo siltoso 2.	173
Figura 4.5 – Ajuste de Gardner aos dados experimentais obtidos em centrífuga e comparação com a curva obtida pelo método de papel filtro para o solo siltoso 1.	174
Figura 4.6 – Ajuste de Gardner aos dados experimentais obtidos em centrífuga e comparação com a curva obtida pelo método de papel filtro para o solo siltoso 2.	174
Figura 4.7 – Resultados de condutividade hidráulica em função da sucção para ensaio em centrífuga com o solo siltoso 1.	176

Figura 4.8 – Resultados de condutividade hidráulica em função da sucção para ensaio em centrífuga com o solo siltoso 2.	177
Figura 4.9 – Curvas de volume de água ao longo do tempo para amostra de solo siltoso 1 sobre pedra cerâmica de 13 mm: (a) $V \times \sqrt{t}$ e (b) $V \times t$	178
Figura 4.10 – Curvas de volume de água ao longo do tempo para amostra de solo siltoso 1 sobre pedra cerâmica de 24 mm: (a) $V \times \sqrt{t}$ e (b) $V \times t$	179
Figura 4.11 – Curvas de volume de água ao longo do tempo para amostra de solo siltoso 2 sobre pedra cerâmica de 13 mm: (a) $V \times \sqrt{t}$ e (b) $V \times t$	180
Figura 4.12 – Curvas de volume de água ao longo do tempo para amostra de solo siltoso 2 sobre pedra cerâmica de 24 mm: (a) $V \times \sqrt{t}$ e (b) $V \times t$	181
Figura 4.13 – Comparação entre dados experimentais obtidos em centrífuga e modelo de Mualem-van Genuchten para o solo siltoso 1.....	183
Figura 4.14 – Comparação entre dados experimentais obtidos em centrífuga e modelo de Mualem-van Genuchten para o solo siltoso 2.....	184
Figura 4.15 – Comparação entre dados experimentais obtidos em centrífuga e modelo de Gardner para o solo siltoso 1.....	185
Figura 4.16 – Comparação entre dados experimentais obtidos em centrífuga e modelo de Gardner para o solo siltoso 2.....	185
Figura 4.17 – Comparação dos resultados de condutividade hidráulica para os dois solos finos.....	186
Figura 4.18 – Variação do volume acumulado de fluxo de saída durante ensaio com areia.....	189
Figura 4.19 – Variação do volume acumulado de fluxo de saída durante ensaio com silte 1.	190
Figura 4.20 – Variação do volume acumulado de fluxo de saída durante ensaio com silte 2.	191
Figura 4.21 – Série temporal de umidade volumétrica para ensaio com areia.	193
Figura 4.22 – Série temporal de umidade volumétrica para ensaio com silte 1: (a) Amostra 1 e (b) Amostra 3.....	194
Figura 4.23 – Série temporal de umidade volumétrica para ensaio com silte 2.	195

Figura 4.24 – Variação do perfil de umidade volumétrica com o tempo e estágio para ensaio com areia.....	195
Figura 4.25 – Variação do perfil de umidade volumétrica com o tempo e estágio para ensaio com solo siltoso 1: (a) Amostra 1 e (b) Amostra 3.....	196
Figura 4.26 – Variação do perfil de umidade volumétrica com o tempo e estágio para ensaio com solo siltoso 2.	197
Figura 4.27 – Série temporal de sucção para ensaio com areia.	198
Figura 4.28 – Série temporal de sucção para ensaio com silte 1: (a) amostra 1 e (b) Amostra 3.....	199
Figura 4.29 – Série temporal de sucção para ensaio com silte 2.....	200
Figura 4.30 – Variação do perfil de sucção com o tempo e estágio para ensaio com solo siltoso 1: (a) Amostra 1 e (b) Amostra 3.....	201
Figura 4.31 – Variação do perfil de sucção com o tempo e estágio para ensaio com areia.....	202
Figura 4.32 – Variação do perfil de sucção com o tempo e estágio para ensaio com solo siltoso 2.....	202
Figura 4.33 – Resultados experimentais de ensaios em permeâmetro com pressurização de ar e curvas dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner para solo arenoso.....	204
Figura 4.34 – Resultados experimentais de ensaios em permeâmetro com pressurização de ar e curvas dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner para solo siltoso 1.	207
Figura 4.35 – Resultados experimentais de ensaios em permeâmetro com pressurização de ar e curvas dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner para o solo siltoso 2.	209
Figura 4.36 – Perfil de condutividade hidráulica.....	211
Figura 4.37 – Solo arenoso ao final do ensaio em permeâmetro.....	212
Figura 4.38 – Solo siltoso 1 ao final do ensaio em permeâmetro: (a) Amostra 1; (b) Amostra 3.....	212
Figura 4.39 – Solo siltoso 2 ao final do ensaio em permeâmetro.....	213
Figura 4.40 – Comparação entre resultados obtidos em centrífuga e em permeâmetro para o solo siltoso 1.	213
Figura 4.41 – Comparação entre resultados obtidos em centrífuga e em permeâmetro para o solo siltoso 2.	214

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Métodos experimentais para determinação ou controle da sucção.	38
Tabela 2.2 – Funções para descrição da curva de retenção de umidade do solo.	47
Tabela 2.3 – Classificação dos solos de acordo com a sua condutividade hidráulica.	54
Tabela 2.4 – Classificação dos solos de acordo com a sua condutividade hidráulica.	55
Tabela 2.5 – Modelos para função de condutividade hidráulica.	63
Tabela 2.6 – Alguns métodos para determinação da função de condutividade hidráulica.	69
Tabela 3.1 – Características do solo arenoso.	94
Tabela 3.2 – Resultados do ensaio para verificação do índice de vazios máximo.	95
Tabela 3.3 – Resultado do ensaio de coluna drenante.	101
Tabela 3.4 – Parâmetros de van Genuchten e de Gardner para o solo arenoso.	103
Tabela 3.5 – Resultados do ensaio de condutividade hidráulica saturada para a areia.	105
Tabela 3.6 – Porcentagens das frações de partículas do solo fino 1.	107
Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de caracterização para o solo fino 1.	108
Tabela 3.8 – Dados do ensaio de papel filtro para solo siltoso 1.	109
Tabela 3.9 – Parâmetros de van Genuchten e de Gardner para o solo siltoso 1.	112
Tabela 3.10 – Condutividade hidráulica saturada do solo siltoso 1 obtida por meio de ensaio de adensamento e ensaio de carga variável.	113
Tabela 3.11 – Condutividade hidráulica saturada do solo siltoso 1 obtida por meio de ensaio de cisalhamento direto – estágio de consolidação.	114
Tabela 3.12 – Porcentagens das frações de partículas do solo fino 2, conforme classificação ABNT (NBR 6502).	116
Tabela 3.13 – Resultados dos ensaios de caracterização para o solo fino 2.	116

Tabela 3.14 – Dados do ensaio de papel filtro para solo siltoso 2.	117
Tabela 3.15 – Parâmetros de van Genuchten e de Gardner para o solo siltoso 2.	121
Tabela 3.16 – Condutividade hidráulica saturada do solo siltoso 2 obtida por meio de ensaio de adensamento e ensaio de carga variável.....	122
Tabela 3.17 – Distâncias do eixo de rotação a diferentes alturas da amostra (r_1) para diferentes discos cerâmicos.	129
Tabela 3.18 – Magnitudes de sucção impostas em função da altura do disco cerâmico e velocidade de rotação.....	129
Tabela 3.19 - Níveis de gravidade induzidos no centro da amostra para cada velocidade angular aplicada.....	130
Tabela 3.20 – Características das amostras para ensaio em centrífuga.....	131
Tabela 3.21 – Curvas de calibração do TDR para os três solos utilizados. ...	157
Tabela 3.22 – Características das amostras de solo siltoso 1 para ensaio em permeâmetro.....	159
Tabela 3.23 – Características da amostra de solo siltoso 2 para ensaio em permeâmetro.....	159
Tabela 3.24 – Pressões de ar aplicadas em cada ensaio em permeâmetro..	163
Tabela 4.1 – Valores de sucção e umidade volumétrica obtidos em ensaio em centrífuga com o solo siltoso 1.....	170
Tabela 4.2 – Valores de sucção e umidade volumétrica obtidos em ensaio em centrífuga com o solo siltoso 2.....	171
Tabela 4.3 - Parâmetros de ajuste da curva de retenção de umidade dos solos finos em centrífuga.....	175
Tabela 4.4 – Umidades volumétricas no topo da coluna de solo ao final de cada estágio de pressurização para areia e silte 1.....	197
Tabela 4.5 – Umidades volumétricas no topo da coluna de solo ao final de cada estágio de pressurização para silte 2.....	197
Tabela 4.6 – Resultados experimentais do ensaio em permeâmetro para areia com análise através da lei de Darcy.....	203
Tabela 4.7 – Resultados experimentais do ensaio em permeâmetro para areia com análise através da equação de Richards.....	204
Tabela 4.8 – Resultados experimentais do ensaio em permeâmetro para silte 1 (amostras 1 e 3) com análise através da lei de Darcy.....	205

Tabela 4.9 – Resultados experimentais do ensaio em permeâmetro para silte 1 (amostra 3) com análise através da equação de Richards.	206
Tabela 4.10 – Resultados experimentais do ensaio em permeâmetro para silte 2 com análise através da equação de Richards.....	208
Tabela 4.11 – Resultados experimentais do ensaio em permeâmetro para silte 2 com análise através da lei de Darcy.....	209

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Análise dos dados através da lei de Darcy.....	188
Quadro 4.2 - Análise dos dados através da equação de Richards.....	189

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade
h_c	Altura capilar
H_{50}	Altura de solo correspondente a 50% do adensamento primário
H_{90}	Altura de solo correspondente a 90% do adensamento primário
H_0	Altura de solo correspondente ao início do adensamento
A, a	Áreas
h_e, z	Carga de elevação
z_m	Carga de elevação em centrífuga
h_p	Carga de pressão
h_m	Carga hidráulica em centrífuga
h	Carga hidráulica total
c_v	Coeficiente de adensamento
a_v	Coeficiente de compressibilidade
R^2	Coeficiente de correlação
L	Comprimento da amostra de solo
L_m	Comprimento da amostra de solo em centrífuga
l	Comprimento da sonda de TDR
K	Condutividade hidráulica
K_{sat}	Condutividade hidráulica saturada
k_a	Constante dielétrica do solo
G	Densidade relativa dos grãos
Δh	Diferença de carga hidráulica
$C(\psi)$	Fator de correção do modelo de Fredlund e Xing (1994) para CRUS
i	Gradiente hidráulico
S	Grau de saturação
S_e	Grau de saturação efetivo
e	Índice de vazios
e_0	Índice de vazios inicial

$e_{m\acute{a}x}$	Índice de vazios máximo
$e_{m\acute{i}n}$	Índice de vazios mínimo
M_s	Massa de sólidos
M	Massa de solo
ρ_w	Massa específica da água
ρ	Massa específica do solo
ρ_d	Massa específica seca
N_r	Nível de gravidade em centrífuga
Θ	Parâmetro adimensional de umidade volumétrica
λ	Parâmetro de ajuste do modelo de Brooks e Corey (1962) para CRUS
α, m, n	Parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (1980)
a, b	Parâmetros de ajuste dos modelos de Gardner (1958), Williams <i>et al.</i> (1983) e McKee e Humb (1984).
W_w	Peso de água
W_s	Peso de sólidos
W	Peso de solo
γ_w	Peso específico da água
γ	Peso específico do solo
γ_g	Peso específico real dos grãos
γ_d	Peso específico seco
η	Porosidade
u_w	Pressão de água
u_a	Pressão de ar
r_0	Raio da centrífuga
r_2	Raio do eixo da centrífuga à superfície de gotejamento
r_1	Raio do eixo da centrífuga ao centro da amostra de solo
ψ_{res}	Sucção correspondente à umidade volumétrica residual
ψ_0	Sucção imposta na base do modelo
ψ_m	Sucção mátrica

ψ_{s1}	Sucção na altura de instalação da sonda de TDR nº 1 (17,5 cm)
ψ_{s2}	Sucção na altura de instalação da sonda de TDR nº 2 (12,5 cm)
ψ_{s3}	Sucção na altura de instalação da sonda de TDR nº 3 (7,5 cm)
ψ_{s4}	Sucção na altura de instalação da sonda de TDR nº 4 (2,5 cm)
ψ_{base}	Sucção na base da amostra de solo
ψ_{final}	Sucção no centro da amostra ao final de um estágio de pressão em centrífuga
$\psi_{início}$	Sucção no centro da amostra no início de um estágio de pressão em centrífuga
ψ_{topo}	Sucção no topo da amostra de solo
Ω	Sucção osmótica
ψ_b	Sucção relacionada ao valor de entrada de ar
ψ	Sucção total
t	Tempo
$t_{médio}$	Tempo médio de fluxo
t_{90}	Tempo para que ocorra 90% do adensamento
σ	Tensão
w	Umidade gravimétrica
θ	Umidade volumétrica
θ_{sat}	Umidade volumétrica de saturação
θ_{res}	Umidade volumétrica residual
Δz	Variação de altura
ΔV	Variação de volume
Δt	Variação do tempo
Q	Vazão
v	Velocidade
ω	Velocidade angular
v_m	Velocidade de descarga aplicada em centrífuga
$\overline{v_m}$	Velocidade de descarga média em centrífuga
\overline{v}	Velocidade de descarga média em permeâmetro
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo

V_w	Volume de água
V_a	Volume de ar
V_s	Volume de sólidos
V	Volume de solo
V_v	Volume de vazios

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

CPT	<i>Cone Penetrometer</i> (Penetrômetro de Cone)
CRUS	Curva de Retenção de Umidade do Solo
IFC	<i>Internal flow control</i> (Controle interno de fluxo)
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i> (técnica de reflectometria no domínio do tempo)
UFA	<i>Unsaturated flow apparatus</i> (Aparato de fluxo não saturado)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
1.1	OBJETIVOS	26
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1	CONCEITOS BÁSICOS DE FLUXO EM MEIO POROSO NÃO SATURADO	29
2.1.1	Relação entre as fases do solo	29
2.1.2	Sucção.....	31
2.1.3	Perfil de umidade e sucção em solo não saturado e características do fluxo de água.....	32
2.1.4	Curva de retenção de umidade	33
2.1.4.1	Métodos para determinação da CRUS	37
2.1.4.1.1	Métodos experimentais.....	37
2.1.4.1.2	Modelos matemáticos para descrição da CRUS	45
2.1.5	Condutividade hidráulica e equações governantes do fluxo em solo não saturado	47
2.1.5.1	Principais fatores que influenciam na condutividade hidráulica	52
2.2	FLUXO EM MEIO POROSO SUBMETIDO A CAMPO GRAVITACIONAL ACELERADO	57
2.3	MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	62
2.3.1	Modelos preditivos e descritivos	62
2.3.2	Métodos experimentais.....	68
2.3.2.1	Perfil instantâneo	72
2.3.2.2	Fluxo de saída (<i>outflow methods</i>)	72
2.3.2.3	Centrífuga	74
2.3.2.3.1	Métodos permanentes	75
2.3.2.3.2	Métodos transientes	86
2.3.3	Condutividade hidráulica saturada	87
3	COMPONENTE EXPERIMENTAL.....	90
3.1	CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS.....	91
3.1.1	Areia	92

3.1.1.1	Granulometria e classificação	92
3.1.1.2	Compacidade.....	94
3.1.1.3	Curva de retenção de umidade do solo (CRUS).....	95
3.1.1.4	Umidade residual	104
3.1.1.5	Condutividade hidráulica saturada.....	105
3.1.2	Silte 1.....	106
3.1.2.1	Granulometria, consistência e classificação	106
3.1.2.2	Compactação.....	108
3.1.2.3	Curva de retenção de umidade do solo (CRUS).....	109
3.1.2.4	Condutividade hidráulica saturada.....	112
3.1.3	Silte 2.....	115
3.1.3.1	Granulometria, consistência e classificação	115
3.1.3.2	Curva de retenção de umidade do solo (CRUS).....	117
3.1.3.3	Umidade residual	121
3.1.3.4	Condutividade hidráulica saturada.....	122
3.2	DETERMINAÇÃO DA CRUS E FUNÇÃO K EM CENTRÍFUGA DE PEQUENA ESCALA.....	125
3.2.1	Descrição da centrífuga.....	125
3.2.2	Moldagem das amostras de solo.....	130
3.2.3	Procedimento de ensaio para CRUS.....	132
3.2.4	Procedimento de ensaio para Função-K	136
3.3	DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO-K COM APLICAÇÃO DE PRESSÃO DE AR EM PERMEÂMETRO	143
3.3.1	Descrição do permeâmetro	143
3.3.1.1	Sistema de pressurização de ar.....	145
3.3.1.2	Cilindro do corpo de prova	148
3.3.1.3	Reservatório inferior.....	150
3.3.1.4	Sensores de TDR	152
3.3.2	Moldagem do corpo de prova	157
3.3.2.1	Areia	158
3.3.2.2	Solos finos	159
3.3.3	Procedimento de ensaio	161
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	170
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CENTRÍFUGA.....	170

4.1.1	Curva de retenção de umidade do solo	170
4.1.2	Condutividade hidráulica não saturada.....	176
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS EM PERMEÂMETRO COM APLICAÇÃO DE PRESSÃO DE AR	188
4.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	213
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	215
6	REFERÊNCIAS	221
	APÊNDICE A.....	228

1 INTRODUÇÃO

Na quantificação do fluxo em meio poroso, tanto saturado, como não saturado, a condutividade hidráulica aparece como variável essencial. A sua determinação é de extrema importância para qualquer projeto que envolva a percolação por meio poroso, como em construções de barragens de terra, avaliação de estabilidade de taludes, investigação da contaminação de solo, impermeabilização de base e topo de aterros sanitários, e muitos outros.

Muitos projetos geotécnicos situados próximos à superfície do solo envolvem condições não saturadas. Apesar disso, as análises tradicionais das respostas mecânicas e hidráulicas das estruturas de terra geralmente assumem condições saturadas do solo. Essa simplificação leva em conta o pior cenário de fluxo possível, mas, não permite a otimização no dimensionamento da estrutura para as condições de campo.

As propriedades hidráulicas dos solos para esses problemas de engenharia devem ser determinadas usando técnicas que foram verificadas experimentalmente, a fim de se obter uma análise de fluxo confiável para a movimentação de água no solo. As dificuldades impostas a essa verificação, relacionadas ao tempo e custo de ensaios laboratoriais, essencialmente para solos não saturados, levam os engenheiros a utilizar métodos indiretos que não necessariamente são válidos para o tipo de solo em que estão trabalhando, ou então, utilizam-se de propriedades saturadas em problemas envolvendo solos não saturados (Dell'Avanzi, 2004; Zornberg e McCartney, 2010).

A condutividade não saturada deve ser representada por uma curva de condutividade em função da umidade ou sucção do solo, também chamada de função de condutividade ou apenas Função-K. Existe uma grande quantidade de métodos para determinar essa função, os quais se dividem em experimentais e modelos matemáticos. Os métodos experimentais podem ser laboratoriais ou de campo. A maioria dos métodos laboratoriais envolve a utilização de um equipamento denominado permeâmetro, que permite a percolação de água através de amostra de solo em condições de contorno controladas. Os modelos envolvem relações empíricas entre a função condutividade e a curva de retenção de umidade do solo (CRUS - curva que

relaciona sucção e umidade para dado solo) ou suas propriedades volume-massa (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Segundo Hillel (1982), o coeficiente de permeabilidade é melhor obtido a partir de medidas experimentais, pois não há predição teórica comprovada. Apesar disso, para as medidas experimentais, existe ainda a dificuldade relacionada ao tempo de ensaio que, para baixos teores de umidade, ou altas sucções, pode ser tão alto que impõe uma restrição à realização dos ensaios.

Apesar da existência de muitos métodos para estimativa da função de condutividade para solos não saturados, seu uso na prática se restringe ao meio acadêmico em vista do longo tempo que esses ensaios demandam e dos procedimentos experimentais complexos (McCartney e Parks, 2009).

Para tentar solucionar o problema de tempo de ensaios alguns autores (Nimmo *et al.*, 1987; Conca e Wright, 1992; Dell'Avanzi, 2004; Zornberg e McCartney, 2010; Reis *et al.*, 2011) utilizaram ensaios com centrífugas a fim de acelerar o fluxo através do meio poroso e viabilizar a determinação de propriedades hidráulicas de solos de baixa condutividade hidráulica. O método centrífugo consiste em uma boa alternativa para avaliar a curva de condutividade hidráulica para solos não saturados, pois demanda menos tempo que os métodos de gravidade normal existentes e permite melhor controle das condições de fluxo, levando a medidas mais acuradas (Nimmo *et al.*, 1987, 2002; Conca e Wright, 1992; Dell'Avanzi, 2004; van den Berg *et al.*, 2009; Zornberg e McCartney, 2010).

Dell'Avanzi (2006) comparou dados do modelo preditivo de Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) e determinações experimentais da Função-K em centrífuga para um solo granular. A comparação entre os resultados indicou que a estimativa usando o modelo difere consideravelmente do valor real, obtido experimentalmente. Essa diferença aumentou com a redução da umidade do solo, chegando a uma variação da ordem de 10^2 . Os resultados obtidos por Dell'Avanzi (2006) para solos granulares, e confirmados por outros autores (McCartney e Parks, 2009; McCartney e Zornberg, 2010), ressaltam a importância da comparação de dados de modelo com dados experimentais para outros tipos de solo, principalmente solos finos, visto que nos solos finos a condutividade apresenta menores valores do que em solos grossos podendo

resultar em maior diferença entre comportamento experimental e obtido por meio de modelo preditivo.

De acordo com Masrouri *et al.* (2008), ao longo dos anos um grande número de métodos diretos para determinação de K foi sugerido. Mas, segundo os autores, ainda existem poucos dados experimentais na literatura referentes às propriedades hidráulicas não saturadas de solos finos com baixa permeabilidade.

Considerando a contextualização apresentada, existe uma carência, na prática de engenharia, com relação à determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados. Sendo assim, o desenvolvimento de métodos experimentais mais rápidos e confiáveis para a determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos é essencial para uma melhor caracterização dos solos. Esses métodos devem subsidiar o dimensionamento mais preciso de projetos de engenharia envolvendo solos não saturados, com redução de custos. Também é fundamental identificar, por meio de comparações com dados experimentais, a acurácia dos modelos preditivos, usados para estimar a Função-K, principalmente no caso de solos finos, a fim de validar seus usos.

1.1 OBJETIVOS

Dentro do contexto apresentado, o principal objetivo deste estudo é avaliar e comparar os resultados de diferentes métodos para estimativa da função de condutividade hidráulica (Função-K) de solos não saturados. Foram avaliados dois métodos experimentais, um deles em centrífuga de pequena escala e o outro utilizando permeâmetro com pressurização de ar; e dois modelos: modelo preditivo de Mualem-van Genuchten, e modelo descritivo de Gardner. Através desses métodos, avaliou-se o comportamento de um solo grosso e dois solos finos.

Como não há dados de literatura que indiquem uma metodologia para análise de ensaio de condutividade hidráulica não saturada com aplicação de pressão de ar, um dos objetivos do estudo consistiu também em analisar a melhor forma de interpretação dos dados medidos para determinação da Função-K através da aceleração do fluxo por pressurização de ar.

Além dos já mencionados, deve-se citar também um objetivo específico que corresponde ao resultado de uma etapa intermediária que deve ser realizada para a operação do permeâmetro: a avaliação do uso de sensores de umidade (TDR) para a medição de umidade e sucção de solos em laboratório.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo que no Capítulo 1 apresenta-se a introdução com a contextualização do problema de pesquisa, os objetivos do estudo e o presente item, indicando resumidamente o conteúdo de cada capítulo que será apresentado.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica dos aspectos relacionados a fluxo em solos não saturados e métodos para determinação da condutividade hidráulica não saturada.

O Capítulo 3 apresenta a descrição da componente experimental do estudo. Descreve os equipamentos, instrumentação, solos e metodologias de ensaio que foram utilizadas para determinação das características dos solos avaliados (granulometria, compacidade, consistência, curva de retenção de umidade do solo, parâmetros de ajuste dos modelos utilizados e condutividade hidráulica saturada) e das curvas de condutividade hidráulica não saturada dos solos.

O Capítulo 4 indica os resultados dos ensaios para a função de condutividade hidráulica não saturada, realizados em centrífuga e em permeâmetro, assim como as curvas obtidas por meio dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner, avaliando e discutindo comparativamente esses resultados para cada solo analisado.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo bem como as sugestões para realização de trabalhos futuros sobre o tema.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a seguir apresenta, primeiramente, os principais conceitos teóricos a respeito de fluxo em solos não saturados, trata dos conceitos básicos de lei de Darcy, condutividade hidráulica, umidade volumétrica, sucção, das relações entre estas três variáveis (curva de retenção de umidade do solo e curva de condutividade hidráulica) e da utilização de instrumentação de TDR para determinação da umidade/sucção do solo. Descreve-se, na sequência, o fluxo em meio poroso sob ação de força centrípeta (fluxo em centrífuga). Estes conceitos básicos são essenciais para o entendimento dos diversos métodos existentes para determinação, tanto experimental quanto modelos matemáticos, da condutividade hidráulica de solos não saturados em campo gravitacional normal e em centrífuga.

Em seguida, são apresentadas considerações sobre os métodos de predição da função de condutividade hidráulica e descritos em detalhe os procedimentos para definição da Função-K a partir dos modelos de Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) e de Gardner (1958).

Os métodos diretos (experimentais) permanentes e transientes para a determinação da condutividade não saturada são brevemente apresentados, considerando principalmente dados de Benson e Gribb (1997) e Masrouri *et al.* (2008), com ênfase para os métodos transientes.

Por fim, os métodos centrífugos existentes são descritos e comparados em detalhe, em vista de sua relevância para o presente estudo. Dentre os trabalhos analisados sobre este assunto destaca-se Dell'Avanzi (2004), Dell'Avanzi (2006), Reis *et al.* (2011) e Sterck (2011) pois tratam dos mesmos equipamentos que foram utilizados na componente experimental deste estudo para determinação de curva de condutividade hidráulica.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE FLUXO EM MEIO POROSO NÃO SATURADO

2.1.1 Relação entre as fases do solo

O solo é um sistema multifásico composto de sólido (grãos do solo), água e ar. O estado em que o solo se encontra é determinado pela relação entre os pesos e volumes dessas fases, podendo ser seco, saturado ou não saturado.

As relações entre volumes (volume de ar V_a , volume de água V_w e volume de sólidos V_s) são dadas pelo índice de vazios, porosidade, grau de saturação e umidade volumétrica.

A proporção entre o volume de vazios (ar ou água) V_v e o volume de sólidos V_s é indicada pelo índice de vazios de um solo:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\eta}{1 + \eta} \quad (2.1)$$

Onde η é a porosidade do solo, que consiste na relação entre o volume de vazios V_v e o volume total do solo V .

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (2.2)$$

O grau de saturação é indicado pela proporção entre volume de água e o volume de vazios no solo:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.3)$$

A umidade volumétrica (θ) de um solo é a proporção entre o volume de água (V_w) e o volume total (V) do solo. A relação entre grau de saturação e umidade volumétrica é dada com base na porosidade:

$$\theta = \eta \cdot S \quad (2.4)$$

A quantidade de água presente em um solo pode também ser identificada através do teor de umidade, teor de água, ou umidade gravimétrica (w) que consiste em uma relação de peso entre peso de água (W_w) e peso dos sólidos (W_s).

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.5)$$

A relação entre o peso ou massa e o volume do sistema é dada pelo seu peso específico ou massa específica, respectivamente:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.6)$$

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.7)$$

Sendo M a massa do solo. A relação entre peso específico e massa específica é igual à aceleração da gravidade ($\gamma = \rho \cdot g$).

O peso e a massa específica podem ser determinados também com base no peso e massa apenas dos sólidos existentes no solo ao invés do total, dando origem ao peso específico seco (γ_d) e à massa específica seca (ρ_d).

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2.8)$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (2.9)$$

A relação entre pesos ou massas específicas do solo e da água dá origem a uma variável adimensional chamada densidade relativa dos grãos (G). A densidade relativa dos grãos é uma variável essencial na caracterização do solo, com alguns valores de referência tabelados para diversos minerais.

$$G = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (2.10)$$

2.1.2 Sucção

Conforme Fredlund e Rahardjo (1993), pode ser definida uma quarta fase para o solo caracterizada pela interface entre as fases água e ar, chamada de membrana contrátil.

Para análise das relações massa-volume do solo não saturado a membrana contrátil é considerada como parte da fase água.

A membrana contrátil tem como propriedade a capacidade de tração, chamada de tensão superficial. A tensão superficial está relacionada a diferença de forças na interface entre água e ar, que tende a produzir uma tração ao longo da membrana contrátil, visto que a pressão de ar (u_a) é maior do que a pressão de água (u_w).

A diferença entre as pressões de ar e de água que causa a curvatura da membrana contrátil (menisco) é chamada de sucção mátrica:

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (2.11)$$

A diferença de pressão ocasiona o fenômeno da capilaridade relacionado à ascensão da água no interior dos poros do solo acima do nível d'água para equilibrar as forças verticais. A ascensão capilar é tanto maior quanto menor for o diâmetro do poro do solo.

Dessa forma, o efeito de tensão superficial associado ao fenômeno de capilaridade na região acima da zona saturada gera uma pressão de magnitude negativa representada pela sucção mátrica.

A sucção normalmente é dividida em dois componentes: o componente matricial, que tende a desaparecer com a saturação, e o componente osmótico (Ω) que surge devido à presença de solutos na água que criam a pressão osmótica. A sucção total é soma da sucção matricial e da sucção osmótica.

$$\psi_m = \Omega + (u_a - u_w) \quad (2.12)$$

Comparada com a sucção matricial, a sucção osmótica é normalmente pequena e pode ser ignorada quando se mede ou se estima a sucção total em condições médias.

2.1.3 Perfil de umidade e sucção em solo não saturado e características do fluxo de água

Considerando um perfil vertical de umidade em um solo de região de clima tropical ou subtropical (Figura 2.1) podem ser identificadas diversas fases com diferentes características de fluxo.

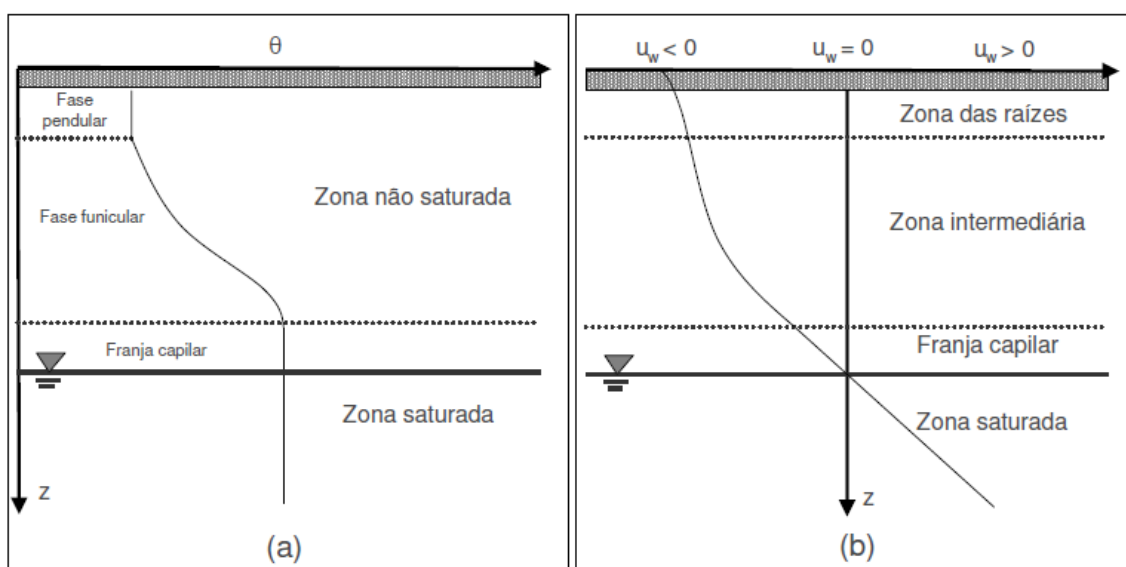


FIGURA 2.1 – PERFIL DE UMIDADE (a) E POROPRESSÃO (b) EM SOLO DE REGIÃO DE CLIMA TROPICAL OU SUBTROPICAL.

A fase saturada corresponde à região abaixo do nível d'água, onde o grau de saturação é unitário, a umidade volumétrica se iguala a porosidade do

solo (umidade na saturação – θ_{sat}) e a sucção é nula. Toda região acima do nível d'água é chamada de zona de ascensão capilar. Na transição entre a fase saturada e a não saturada encontra-se a franja capilar, região de saturação acima do nível d'água, mas com pressão negativa de água, ou seja, sucção.

Acima da franja capilar, o solo se encontra na condição não saturada, com presença de sucção crescente. Do topo da franja capilar até a região onde a umidade fica constante com a redução da profundidade, tem-se a fase funicular, caracterizada pela ocorrência de fluxo não saturado pela presença de fases de ar e água contínuas. Na região mais próxima a superfície do solo, identifica-se a existência de fase de ar contínua e de fase de água descontínua, não havendo fluxo de água na forma líquida, esta fase é chamada de pendular e a umidade correspondente é chamada de umidade residual (θ_{res}), sendo a mínima umidade possível no perfil. O acréscimo de sucção nesta região não alterará mais a umidade.

Normalmente, a região acima do nível d'água é chamada de zona vadosa ou de aeração e a região abaixo deste nível é dita zona freática. Apesar de ser conveniente de se imaginar o nível d'água como camada limite entre as zonas saturada e não saturada, é mais correto identificar este nível apenas como o local em que a carga de pressão se equivale à referência (atmosfera).

2.1.4 Curva de retenção de umidade

A curva de retenção de umidade do solo (CRUS), ou curva característica do solo, consiste na relação entre a sucção e a quantidade de água presente, a qual pode ser definida pelo grau de saturação, umidade gravimétrica ou umidade volumétrica do solo.

Na Figura 2.2 é apresentado um exemplo de CRUS considerando a relação entre sucção e umidade volumétrica. A figura indica algumas regiões importantes da curva:

- o ponto no qual a curva corta o eixo da umidade volumétrica (ponto onde a sucção é nula) representa a saturação do solo, quando a porosidade se iguala a umidade volumétrica;

- a região em que a sucção aumenta com o teor de umidade praticamente constante indica a zona capilar;
- o ponto definido pelo decréscimo acentuado da umidade volumétrica com o aumento da sucção se refere ao valor de entrada de ar, sendo caracterizado pela diferença entre a pressão de ar e de água (sucção) necessária para causar a drenagem do maior poro do solo;
- a região de decaimento da umidade volumétrica com o aumento da sucção indica a região funicular;
- a porção final da curva em que a umidade volumétrica atinge um valor residual caracteriza-se pela região com fase de água descontínua (região pendular), onde não há possibilidade de fluxo de água.

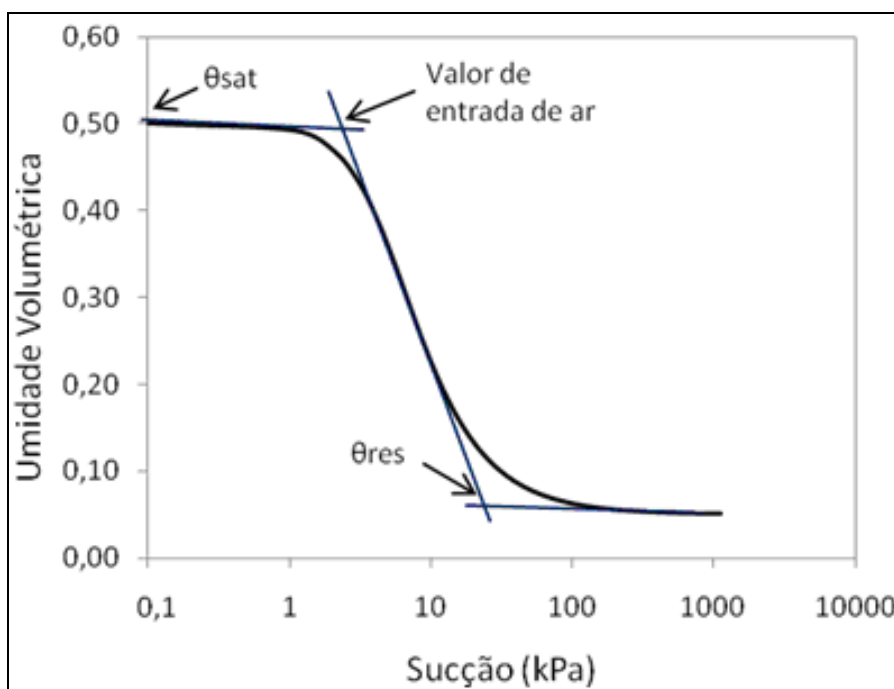


FIGURA 2.2 – EXEMPLO DE UMA CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO

Fonte: Guizelini (2011).

A forma da curva de retenção de umidade do solo depende de diversas características, como a composição mineralógica, a distribuição granulométrica, a textura, a estrutura e o índice de vazios, entre outros. A Figura 2.3 apresenta a variação da curva de retenção para diferentes tipos de solo.

Comparando as diferentes curvas, identifica-se que o solo arenoso apresenta menor valor de entrada de ar, menor zona capilar e decaimento mais acentuado da umidade com o aumento da sucção (ou seja, a água drena mais rapidamente atingindo a umidade volumétrica residual). Como o fenômeno da capilaridade é inversamente proporcional ao tamanho do poro, os solos de granulometria mais fina apresentam maior zona capilar e com isso maior valor de entrada de ar. O decaimento da curva fica mais suave quanto mais fino o solo em virtude da drenagem mais lenta dos poros reduzidos de solos mais finos. Para solos argilosos a umidade residual é atingida apenas para valores muito altos de sucção.

Com relação à umidade volumétrica na saturação, as curvas descrevem o fato de que quanto mais fino o solo teoricamente maior o valor da umidade na saturação, no entanto outros fatores, como o histórico de tensões e o processo de compactação também influenciam na retenção de umidade do solo.

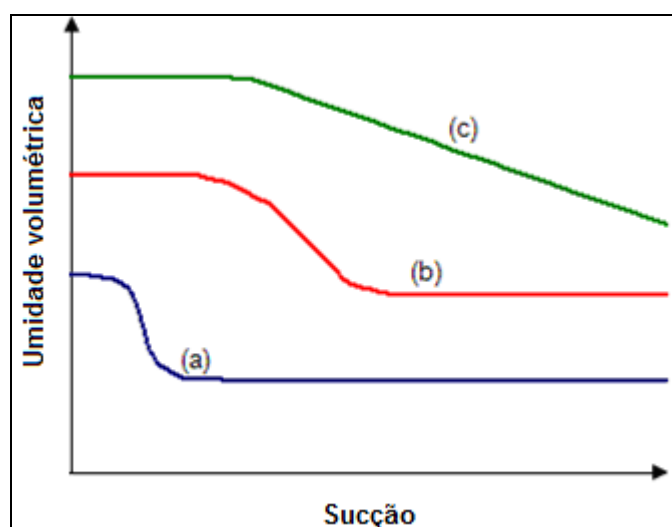


FIGURA 2.3 – EXEMPLO DE CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO: (a) SOLO ARENOSO; (b) SOLO SILTOSO; (c) SOLO ARGILOSO

Fonte: Adaptado de Guizelini (2011).

Outra variação importante da CRUS que deve ser avaliada é com relação ao índice de vazios para determinado solo. A Figura 2.4 apresenta esta variação indicando que quanto maior o índice de vazios inicial, maior a porosidade e, conseqüentemente, maior a umidade volumétrica na saturação. As variações no índice de vazios inicial modificam o valor de entrada de ar,

porém geram pouca alteração na região residual: as curvas, após o valor de entrada de ar, convergem.

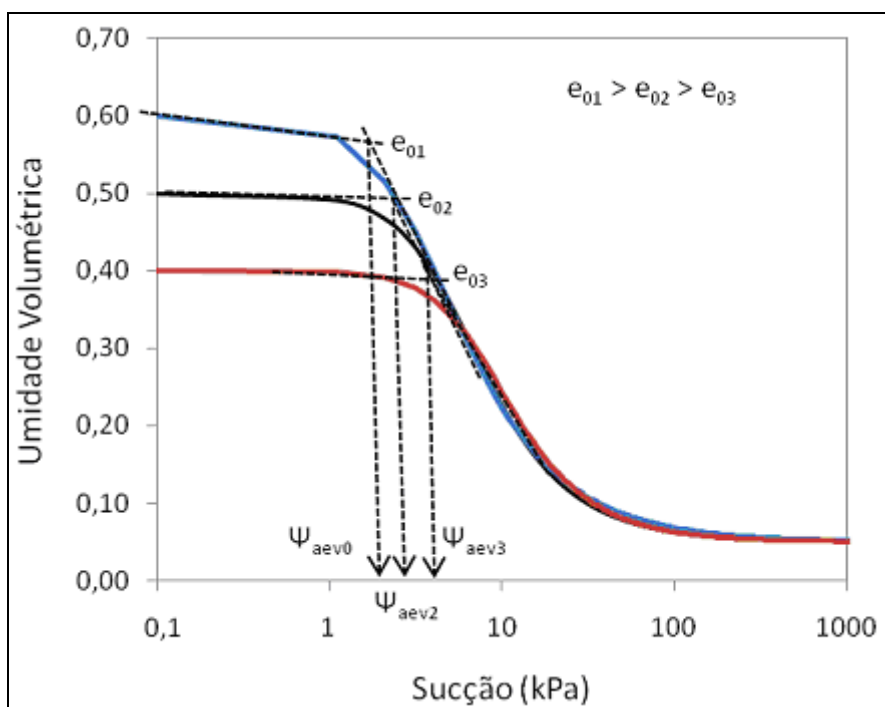


FIGURA 2.4 – VARIAÇÃO DA CRUS COM O ÍNDICE DE VAZIOS DO SOLO.

Fonte: Guizelini (2011).

A relação entre θ e ψ é caracterizada por não linearidade e histerese, ou seja, o comportamento entre as variáveis depende do processo antecedente de umedecimento ou secagem (conforme pode ser observado pelas diferentes trajetórias indicadas na Figura 2.5).

Haines (1930) citado por Narasimhan (2007) estabeleceu experimentalmente a histerese na CRUS. Para explicar a histerese Haines indicou que o modo de distribuição de umidade no solo não permite condições reversíveis. A drenagem tende a ser governada por um maior valor de pressão e controlada pelo tamanho dos menores poros. Já o umedecimento é controlado pelo tamanho dos maiores poros (menor valor de pressão). Em outras palavras, um sistema granular oferecerá maior capilaridade contra a extração de água dos seus poros do que quando absorvendo a água (Narasimhan, 2007). Dessa forma, para determinado valor de sucção a umidade será maior durante a secagem do que durante o umedecimento.

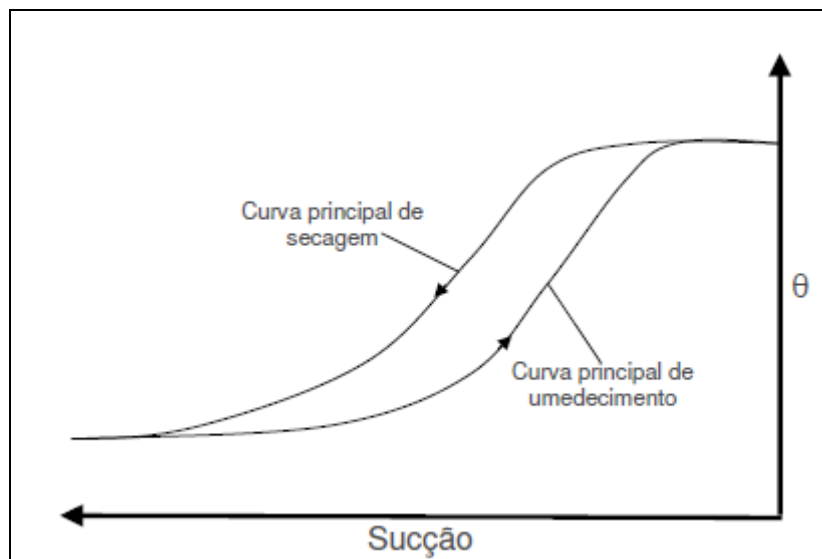


FIGURA 2.5 – HISTERESE NA CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO

2.1.4.1 Métodos para determinação da CRUS

2.1.4.1.1 Métodos experimentais

A curva de retenção de umidade pode ser obtida experimentalmente através de ensaios diretos, por meio de vasos de pressão (vasos extratores), placas de sucção, coluna drenante, TDR, entre outros, ou indiretamente, utilizando o método do papel filtro.

O procedimento padronizado ASTM D6836 descreve cinco procedimentos para a determinação da CRUS entre eles o ensaio com permeâmetro centrífugo.

Masrouri *et al.* (2008) indica vários métodos de diferentes autores para determinação tanto da CRUS quanto da condutividade hidráulica não saturada de solos. Os métodos para definição direta e indireta da Função-K serão descritos com maiores detalhes no item 2.3 desta revisão bibliográfica.

Para determinação experimental da curva de retenção de umidade do solo normalmente determina-se a umidade por secagem em estufa e a sucção é determinada com base em algum método experimental ou controlada por meio do aparato experimental (Masrouri *et al.*, 2008).

Assim os métodos de determinação da CRUS estão associados a métodos de determinação experimental da sucção. A sucção medida pode ser

total (considera o componente osmótico) ou mátrica (despreza o componente osmótico).

Os diversos métodos existentes cobrem diferentes intervalos de variação de sucção, sendo muitas vezes complementares quando se necessita obter uma ampla faixa de valores de sucção para a CRUS.

A Tabela 2.1, extraída de Masrouri *et al.* (2008) indica alguns métodos experimentais para determinação ou controle da sucção visando a obtenção da CRUS.

TABELA 2.1 – MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA DETERMINAÇÃO OU CONTROLE DA SUCÇÃO.

Técnica		Sucção determinada	Medida ou controle de sucção através de	Intervalo de sucção (kPa)
Determinação da sucção	Tensiômetro	Mátrica	Pressão de água negativa	0 – 100
	Sensor de condutividade térmica/elétrica	Mátrica	Condutividade térmica	10 – 4000
	Papel filtro	Mátrica e total	Umidade do papel filtro	100 – 3000
	Psicrômetro	Total	Umidade do vapor	100 – 100000
Controle da sucção	Placa de pressão	Mátrica	Pressão de ar	10 – 15000
	Coluna de solo	Mátrica e total	Pressão de água negativa	0 - 100
	Centrífuga	Mátrica	Força centrífuga	10 - 15000

Fonte: Masrouri *et al.* (2008)

Os métodos para determinação da CRUS de maior interesse para o presente estudo são descritos com mais detalhes na sequência:

- **Coluna drenante:**

O método da coluna drenante consiste em uma forma direta de determinação da CRUS para solos grossos. O procedimento pode ser executado tanto para processo de ascensão capilar (umedecimento) quanto de drenagem livre (secagem).

O aparato para ensaio consiste basicamente em uma coluna de solo, controladores de descarga de água no topo e na base da coluna, um sistema de manutenção do nível d'água na base e opcionalmente sensores de umidade ao longo da coluna de solo (Figura 2.6).

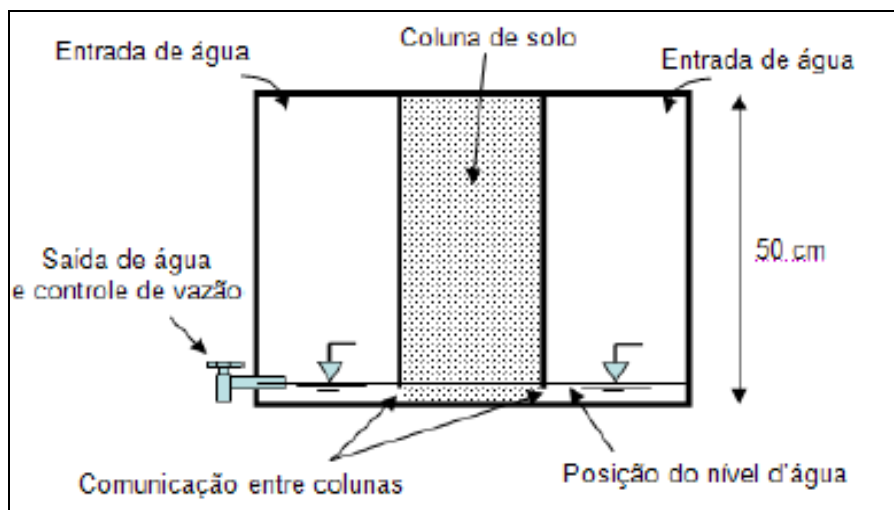


FIGURA 2.6 – ESQUEMA PARA ENSAIO DE COLUNA DRENANTE.

Fonte: Furlan e Dell'Avanzi (2007).

O procedimento consiste basicamente em controlar o nível d'água na base e verificar visualmente a altura capilar ao longo do tempo até a estabilização do perfil. Para ensaio no processo de drenagem a amostra deve ser inicialmente saturada e em seguida permitida a drenagem com monitoramento até a estabilização do perfil de umidade. Para o processo de umedecimento, o nível d'água deve ser fixado na base da amostra e a ascensão capilar monitorada até a estabilização.

A CRUS é obtida pela relação entre a umidade medida e altura capilar. A umidade pode ser determinada por meio de sensores instalados em diferentes alturas da coluna de solo (TDR) ou em estufa através da coleta de amostras em diferentes alturas da coluna. A altura capilar é determinada visualmente pela altura de instalação dos sensores ou altura de retirada da amostra para determinação da umidade em estufa.

- **Papel filtro:**

O método de papel filtro consiste em uma determinação indireta da sucção do solo, pois baseia na determinação da umidade do papel filtro e correlação desta com a sucção por meio de uma curva de calibração de umidade x sucção do papel. Quando em contato por determinado intervalo de tempo (de sete a trinta dias) os materiais (solo e papel filtro) entram em equilíbrio com relação à sucção, de forma que sabendo a sucção do papel

filtro, tem-se a sucção do solo. A umidade associada é determinada em estufa para cada amostra de solo.

A sucção estimada pode ser total ou mátrica dependendo da forma como o papel filtro entra em contato com o solo. Quando o papel filtro é colocado diretamente sobre o solo mede-se a sucção mátrica, pois o fluxo de água do solo para o papel ocorre por capilaridade. A sucção total é determinada quando o papel filtro não fica em contato direto com o solo, para isto normalmente coloca-se um disco perfurado entre o papel e o solo. Neste caso, ocorre um fluxo de vapor d'água do solo para o papel. A Figura 2.7 ilustra a forma de disposição do papel filtro para obtenção da sucção total ou mátrica.

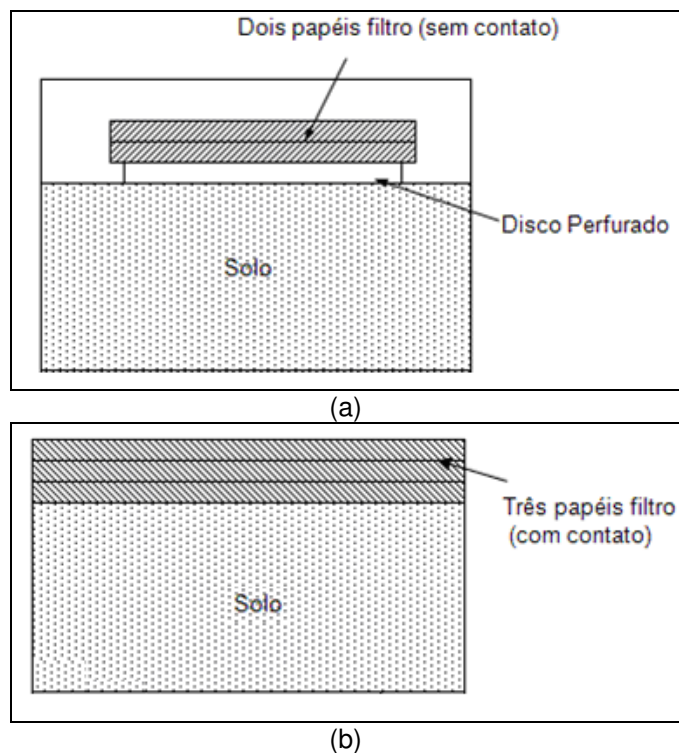


FIGURA 2.7 – DISPOSIÇÃO DE PAPEL FILTRO SOBRE AMOSTRA DE SOLO PARA DETERMINAÇÃO DA SUCÇÃO: (a) TOTAL E (b) MÁTRICA.

Fonte: Adaptado de Guizelini (2011).

A utilização de dois papéis filtros para determinação da sucção total e de três papéis para a mátrica é sugerida por Fredlund e Rahardjo (1993) para que não haja problemas de contaminação externa (embalagem) e interna (próprio solo) do papel filtro central, o qual é efetivamente utilizado para a determinação da sucção.

O ensaio com papel filtro apresenta baixo custo e facilidade na execução. No entanto, se não houver o devido cuidado com o manuseio do papel filtro podem ocorrer erros na determinação da umidade pela sensibilidade do material.

Para atingir o equilíbrio o tempo de equalização deve ser suficiente e a embalagem do conjunto solo-papel filtro deve ser bem vedada e armazenada em recipiente hermético de forma a não haver interações com a umidade do ambiente.

Segundo Marinho (1997) o tempo de equalização de sete dias é suficiente para determinação da sucção mátrica, para qualquer faixa de sucção. Para a sucção total, o tempo suficiente é de sete dias para valores acima de 1 MPa, 30 dias para valores entre 100kPa e 250kPa e mais do que 30 dias para valores menores do que 100kPa.

Existem vários tipos de papéis filtro comerciais largamente utilizados, sendo os principais o Whatman nº 42 e o Schleicher & Schuell nº 589. A cada papel filtro está associada uma curva de calibração de umidade em relação à sucção. Na literatura (ASTM-D5298/92; Chandler *et al.*, 1992; Fredlund e Rahardjo, 1993; Oliveira e Marinho, 2006) encontram-se vários estudos a respeito da curva de calibração para cada tipo de papel, mas não há consenso sobre a curva mais adequada.

A curva de calibração, proposta por Chandler *et al.* (1992) citado por Leong e Rahardjo (2002), para o papel filtro Whatman nº 42 é representada pelas seguintes equações:

$$\psi = 10^{[6,05 - 2,48 \cdot \log(w)]}, \text{ para } w \geq 47\% \quad (2.13)$$

$$\psi = 10^{[4,84 - 0,0622 \cdot w]}, \text{ para } w < 47\% \quad (2.14)$$

- **Método em centrífuga de pequena escala:**

O método para determinação da CRUS em centrífuga de pequena escala (Reis *et al.*, 2011; Sterck, 2011) consiste na imposição de sucção a amostras de solo pequenas, dispostas no interior de uma centrífuga especialmente modificada para comportar quatro amostras de solo. A sucção

imposta varia conforme a velocidade de rotação aplicada, de forma que, a cada estágio de rotação é possível obter um par de umidade-sucção para cada amostra de solo.

A centrífuga é parada de tempo em tempo e as amostras inicialmente saturadas são pesadas para verificação da condição de equilíbrio (fluxo de água nulo, ou seja, massa da amostra constante). Na condição de equilíbrio, associa-se o valor de umidade, calculado com base na variação de massa da amostra, à sucção, imposta através da rotação da amostra.

Este método de determinação da CRUS, proposto por Reis *et al.* (2011) e Sterck (2011), foi utilizado no presente estudo para estimativa da CRUS de dois solos siltosos. Os detalhes da metodologia e aparato experimental empregados são descritos no Capítulo 3, item 3.2.

- **Determinação da umidade do solo:**

O procedimento de determinação do teor de umidade de solos mais comum é dado pela norma NBR 6457/1986 da ABNT. O procedimento geral consiste em tomar uma quantidade de material, colocá-lo em uma cápsula metálica, pesando o conjunto e colocar a cápsula em estufa à temperatura de 105 a 110 °C por intervalo de 16 a 24 horas, até que a massa da amostra permaneça constante com o tempo. Após secagem em estufa a cápsula com solo seco é transferida para o dessecador, onde permanece até atingir temperatura ambiente. Efetua-se então nova pesagem do conjunto (cápsula e solo) em balança adequada. A umidade do solo é calculada com base nos pesos do solo úmido e seco em estufa a partir da Equação 2.5.

No entanto, existem várias situações em que não é possível extrair uma amostra de solo para determinação da umidade em estufa, como é o caso, por exemplo, do monitoramento de um perfil de umidade em uma coluna de solo. Nestas situações, faz-se o uso de dispositivos que permitam medir a umidade volumétrica sem alterar as condições da amostra.

Vários métodos para determinação da condutividade hidráulica utilizam a análise de dados de perfil de umidade do solo. Existem vários aparelhos para realização desta medida, como: TDR (*time domain reflectometry*), sensores de nêutrons, sensores porosos de gesso, absorção por raios Gama, entre outros. Dentre os instrumentos citados os sensores de gesso (também designados

termoblocos) são os mais simples e baratos e que mesmo assim apresentam medidas confiáveis.

Os termoblocos consistem em blocos de gesso contendo dois eletrodos conectados a um fio de chumbo (Zazueta e Xin, 1994; Phene *et al.*, 1971). Quando o dispositivo está enterrado no solo, a água irá circular para dentro ou para fora do bloco até que a umidade do solo e do bloco se iguale, entrando em equilíbrio. Dessa maneira, medindo a umidade no interior do bloco obtém-se a umidade do solo.

A umidade dos blocos de gesso é determinada pela diferença de resistência elétrica, medida pelos eletrodos, antes e após o fornecimento de um pulso de calor ao bloco. O princípio de funcionamento deste sistema considera o fato de que a taxa de dissipação de calor em um meio poroso de baixa condutividade térmica, como é o caso do gesso, é sensível ao conteúdo de água. Quanto maior a umidade, maior a taxa de dissipação de calor e menor a resistência elétrica. Isto decorre do fato de que o ar é um bom isolante térmico quando comparado à água. O conteúdo de água de um material poroso pode, portanto, ser medido fornecendo uma fonte de calor em um ponto centrado no interior do bloco e medindo o aumento de temperatura naquele ponto (Phene *et al.*, 1971).

A variação de resistência, ocasionada pela variação de temperatura é medida através dos eletrodos, gerando um valor de leitura de 0 a 100, sendo 0 para o termobloco seco e 100 na saturação. A leitura do valor medido pelo bloco é realizada conectando os condutores ligados ao bloco ao leitor (*Soilmoisture meter*). O valor da leitura deve ser relacionado à umidade (ou à sucção mátrica) do solo por meio de um procedimento de calibração.

A desvantagem do sistema de blocos porosos é que cada bloco tem características diferentes e devem ser calibrados individualmente (Zazueta e Xin, 1994). Além disso, a calibração muda gradualmente com o tempo, devido à deterioração do gesso pela interação com componentes físico-químicos do solo e alta solubilidade em água (Phene *et al.*, 1971), que altera a porosidade interna do bloco, limitando a sua vida útil.

Por estas razões, a avaliação do conteúdo de água por meio de termoblocos de gesso é de acurácia limitada. Por outro lado, estes sensores

podem ser muito úteis em situações em que se necessita de uma análise simples e de baixo custo.

Os sensores de TDR (*time domain reflectometry*), apesar de muito mais caro que os termoblocos, apresentam resultados mais acurados e possuem maior vida útil, compensando de certa maneira seu alto custo.

Pelo sistema de TDR a umidade ou sucção do solo é inferida indiretamente pela determinação de propriedades dielétricas do solo, apresentando a vantagem de ser uma técnica não destrutiva. O princípio de funcionamento consiste na determinação do tempo de propagação de um sinal de alta frequência através de uma sonda inserida no solo. A velocidade de propagação será dependente das propriedades dielétricas do meio, as quais, por sua vez, dependerão do teor de umidade do solo em contato com a sonda.

A constante dielétrica do solo é determinada a partir da medição do tempo de propagação de um pulso através da sonda inserida no solo, podendo ser descrita pela seguinte equação:

$$k_a = \left(\frac{c\Delta t}{2l} \right)^2 \quad (2.15)$$

Onde c é a velocidade de propagação da luz no vácuo (3×10^8 m/s), Δt é o tempo de propagação através da sonda e l é o comprimento da sonda.

Segundo Suwansawat e Benson (1999), a componente chave do sistema de TDR está na calibração para relacionar a constante dielétrica à umidade volumétrica do solo.

Existem vários modelos tanto empíricos quanto físicos para correlacionar a constante dielétrica à umidade volumétrica do solo (Wright *et al.*, 2001). Os modelos empíricos baseiam-se no ajuste de dados experimentais a relações empíricas, não apresentando justificativa física. Já os modelos físicos tendem a descrever a umidade volumétrica a partir das variáveis da constante dielétrica, como o tempo de propagação. Wright *et al.* (2001) apresenta dez relações para correlação entre k_a e θ . Dentre elas a equação universal de Topp, modelo empírico mais utilizado atualmente (Topp *et al.*, 2000) o qual descreve a umidade como uma função polinomial de terceiro grau de k_a .

$$\theta = -0,053 + 0,0293k_a - 0,00055k_a^2 + 0,0000043k_a^3 \quad (2.16)$$

Siddiqui *et al.* (2000) e Dell'Avanzi (2004) apresentaram uma relação linear entre $\sqrt{k_a}$ e θ , e entre o peso específico seco e a umidade gravimétrica ($\theta = w \gamma_d / \gamma_w$), as quais foram utilizadas para obtenção das curvas de calibração padrão para os solos utilizados neste estudo (apresentadas no item 3.3.1.4).

Suwansawat e Benson (1999) realizaram estudo para determinação das dimensões ótimas de uma célula de calibração de TDR. Conforme os autores, um cilindro com as mesmas dimensões de um molde de compactação padrão (diâmetro de 102 mm e altura de 116 mm) é comprovadamente uma célula de calibração adequada para sondas de TDR com duas ou três hastes, com diâmetro de 4 mm, comprimento de 80 mm e espaçamento de 30 mm ou 20 mm, respectivamente. A distância mínima entre a sonda e as paredes ou a base da célula de calibração, devem ser de 30 mm. Os mesmos autores recomendam a calibração específica para cada solo quando a análise dos valores de umidade obtidos por TDR for quantitativa.

2.1.4.1.2 Modelos matemáticos para descrição da CRUS

Para utilização dos dados experimentais da CRUS nas equações de fluxo (indicadas no item 2.1.5), os valores discretos obtidos experimentalmente devem ser convertidos em funções contínuas através do ajuste de funções matemáticas aos pontos experimentais. Existem vários modelos disponíveis para isto, dentre eles os propostos por van Genuchten (1980) e por Gardner (1958) são os mais utilizados na prática e de maior importância para o presente estudo.

O modelo de Gardner descreve a umidade como uma função exponencial da sucção:

$$\theta(\psi) = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res})e^{-b\psi} \quad (2.17)$$

Onde, θ_{res} é a umidade residual, θ_{sat} é a umidade de saturação e b é um parâmetro de ajuste da equação obtido a partir de ajuste da curva retenção determinada experimentalmente, caracterizado pelo inverso do valor de entrada de ar no solo. A equação de Gardner tem formato de hipérbole, se ajustando bem a porção superior da curva de retenção. Para umidades próximas à saturação a equação não se aplica.

Para este modelo, o termo $\partial\psi/\partial\theta$ é obtido derivando a Equação 2.17:

$$\frac{\partial\psi}{\partial\theta} = -b \frac{e^{b\psi}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (2.18)$$

O modelo de van Genuchten é baseado na seguinte equação:

$$\theta = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (2.19)$$

Onde α , m e n são parâmetros de ajuste empírico independentes, os quais podem ser determinados por meio de técnicas de regressão não linear. Sendo que, $\alpha > 0$ (normalmente, $10^{-3} < \alpha < 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$), $n > 1$ (normalmente $1,2 \leq n \leq 4$), $|\psi| \geq 0$ e $m = 1 - \frac{1}{n}$ com valores entre 0 e 1 (Hillel, 1998).

Fazendo a derivação obtém-se:

$$\frac{\partial\psi}{\partial\theta} = - \frac{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m+1}}{mn\alpha(\alpha\psi)^{n-1}(\theta_{sat} - \theta_{res})} \quad (2.20)$$

Além das equações de van Genuchten (1980) e de Gardner (1958), que serão analisadas neste estudo, existem ainda vários outros modelos para descrição da curva de retenção de umidade do solo, conforme Tabela 2.2.

TABELA 2.2 – FUNÇÕES PARA DESCRIÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO.

Autores	Equação do modelo	Parâmetros
Brooks e Corey (1964)	$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res}) \cdot \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda + \theta_{res}$	ψ_b : valor de entrada de ar λ : índice relacionado à distribuição do tamanho dos poros do solo
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = \theta_{sat} \cdot C(\psi) \left[\frac{1}{\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^n \right)} \right]^m$ $C(\psi) = 1 - \left[\frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_{res}} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_{res}} \right)} \right]^m$	α, m, n : parâmetros de ajuste $C(\psi)$: fator de correção ψ_{res} : sucção correspondente à umidade volumétrica residual 10^6 : valor limite de sucção para qualquer tipo de solo segundo Fredlund e Xing (1994)
Farrel e Larson (1972)*	$\psi = \psi_{cr}^{[b(1-S_e)]}$	b : parâmetro de ajuste S_e : grau de saturação efetivo
Williams <i>et al.</i> (1983)*	$\ln \psi = a + b \cdot \ln \theta$	a e b : parâmetros de ajuste
McKee e Bumb (1984)*	$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[\frac{-(\psi - a)}{b} \right] + \theta_{res}$	a e b : parâmetros de ajuste

*Citados por Leong e Rahardjo (1997)

2.1.5 Condutividade hidráulica e equações governantes do fluxo em solo não saturado

A condutividade hidráulica (K), ou coeficiente de permeabilidade, de um solo representa uma propriedade do meio em transportar água, sendo essencial para a quantificação do fluxo em meio poroso. Quanto maior a condutividade hidráulica do solo mais facilmente a água, ou qualquer líquido, permeia por este solo.

A definição de coeficiente de permeabilidade, ou condutividade hidráulica do solo surge em 1856, com a publicação de "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon" por Henry Darcy. No Apêndice D, intitulado "Determinação das leis de fluxo de água através de areia", o autor descreve e mostra resultados dos experimentos que o levaram a formular a lei de Darcy. Esta lei formou a base para qualquer determinação de fluxo em meio poroso.

Neste estudo, Darcy utilizou um aparato para fluxo, que posteriormente ficou conhecido como permeâmetro de carga constante, no qual era imposta uma carga hidráulica e medido o fluxo de água em litros por minuto em estado permanente. Variando a carga e espessura da amostra e medindo o fluxo, Darcy relacionou o volume de saída como sendo proporcional à carga aplicada e inversamente proporcional à espessura da camada de solo (Darcy, 1856). Esta relação corresponde à lei de Darcy.

A lei de Darcy indica que a taxa de fluxo em meio poroso é proporcional ao gradiente hidráulico (ou gradiente de potencial em termos de carga hidráulica) e a condutividade hidráulica é a propriedade que relaciona estas duas variáveis (Darcy, 1856). Esta lei se aplica somente a solos saturados com fluxo laminar.

Em solos não saturados, a condutividade hidráulica passa a ser uma função da umidade volumétrica ou da sucção do solo. Buckingham aplicou uma fórmula equivalente à lei de Darcy (sem menção específica ao trabalho deste) para fluxo não saturado (Nimmo e Landa, 2005). Quando se introduz a relação de dependência entre condutividade e umidade na lei de Darcy para descrever o fluxo em solos não saturados esta lei passa a ser chamada de lei de Buckingham-Darcy (Equação 2.21) (Buckingham, 1907 citado por Nimmo e Landa, 2005).

$$v = -K(\theta) \frac{dh}{ds} \quad (2.21)$$

A relação entre condutividade hidráulica e umidade volumétrica (ou sucção mátrica) define a função de condutividade hidráulica, ou Função-K do solo, proposta primeiramente por Buckingham, em 1907. Buckingham originou o conceito de potencial mátrico, CRUS e condutividade hidráulica não saturada (K) como propriedades distintas de um solo (Nimmo e Landa, 2005).

A carga hidráulica em meio poroso é obtida a partir da equação de Bernoulli, considerando que a velocidade nos poros do solo é desprezível:

$$h = h_e + h_p \quad (2.22)$$

A carga hidráulica é a soma entre carga de elevação (h_e) e carga piezométrica (h_p). O termo altimétrico é representado pela altura de elevação em relação a determinado referencial e o termo piezométrico é representado pela pressão da água. A natureza da carga pode ser muito diferente quando se compara fluxo saturado e não saturado, principalmente no que diz respeito à carga de pressão.

Quando o solo está saturado, a água está a uma pressão hidrostática maior que a atmosférica (de referência) indicando uma carga de pressão positiva (Hillel, 1998). Nesta condição a água tenderá a se mover espontaneamente para fora do solo. A carga hidráulica para solos saturados é dada pela equação a seguir:

$$h = z + \frac{u_w}{\rho_w g} \quad (2.23)$$

Onde ρ_w é a massa específica da água, g a aceleração da gravidade e u_w é a pressão de água. O termo osmótico (relacionado à concentração de solutos) não é indicado por ser, normalmente, desprezível.

Em solo não saturado, a água não estará livre para fluir para a atmosfera. A tendência espontânea será de o solo atrair água para o seu interior o que corresponde a uma carga de pressão negativa, também chamada de sucção mátrica (Hillel, 1998), dada pela Equação 2.11. A pressão de ar é, em geral, considerada igual à pressão atmosférica, de referência ($u_a = 0$), assim, a sucção mátrica corresponde a uma pressão de água negativa ($\psi = -u_w$). Portanto, em solo não saturado o termo de carga piezométrica é representado pela sucção (ψ) do solo, através da seguinte equação:

$$h = z - \frac{\psi}{\rho_w g} \quad (2.24)$$

Aplicando o princípio da continuidade a um volume de controle de solo, conforme Figura 2.8, considerando fluxo unidimensional na vertical, direção z, obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.25)$$

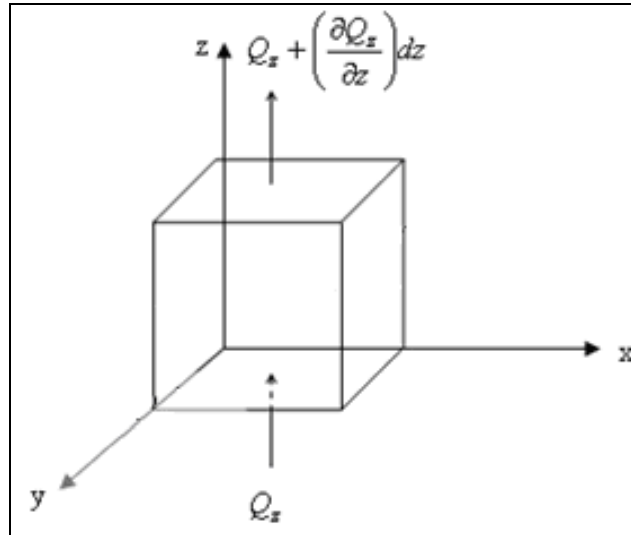


FIGURA 2.8 – VOLUME DE CONTROLE INFINITESIMAL PARA FLUXO DE ÁGUA SOB GRAVIDADE NORMAL.

Fonte: Prevedello (1996).

Substituindo a equação de Buckingham-Darcy para a taxa de fluxo (Equação 2.21) na equação da continuidade (Equação 2.25) e considerando a carga hidráulica para fluxo em solo não saturado dada pela Equação 2.24, obtém-se a equação de Richards unidimensional na vertical (em z).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\theta) \left(1 - \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.26)$$

A equação de Richards é a equação diferencial que governa o movimento da água em solo não saturado, em regime transiente. Em caso de regime permanente, a variação da umidade em relação ao tempo será nula na Equação 2.26.

Dessa forma, o fluxo de água em solos não saturados pode ser descrito através de três variáveis não lineares relacionadas: a umidade volumétrica (θ), a sucção mátrica (ψ) e a condutividade hidráulica (K) (Fredlund e Rahardjo, 1993). A relação entre umidade volumétrica e sucção mátrica corresponde à curva de retenção de umidade do solo (CRUS). Considerando a relação entre umidade e sucção a equação de Richards pode ser escrita em função da sucção da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(1 - \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (2.27a)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \theta} \left[\frac{\partial K_z(\psi)}{\partial z} - \frac{1}{\rho_{wg}} \frac{\partial K_z(\psi)}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{K_z(\psi)}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (2.27b)$$

Em estado permanente tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(1 - \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] = 0 \quad (2.28a)$$

$$\frac{\partial K_z(\psi)}{\partial z} - \frac{1}{\rho_{wg}} \frac{\partial K_z(\psi)}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{K_z(\psi)}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.28b)$$

Rearranjando os termos da Equação 2.28b, obtém-se:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \rho_w g v \frac{\partial [1/K_z(\psi)]}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (2.29)$$

A solução de um problema de fluxo não saturado por meio da equação de Richards envolve a determinação da Função-K do solo e a definição das condições de contorno do problema. Em condições permanentes o perfil de sucção não muda com o tempo e, conseqüentemente, o perfil de sucção é somente uma função de z (conforme equação anterior).

2.1.5.1 Principais fatores que influenciam na condutividade hidráulica

Lambe *et al.* (1969) definem a condutividade hidráulica como a velocidade do líquido permeante pelo solo através de área unitária e com gradiente hidráulico unitário. Sendo assim, esta propriedade dependerá tanto de características do solo quanto de características do líquido.

As propriedades hidráulicas de solos não saturados são função de muitas variáveis. Especificamente a CRUS e a Função-K são sensíveis às variáveis relacionadas à estrutura do solo com distribuição no tamanho dos poros, proporção das frações areia e argila, mineralogia de argila, condições de compactação, mudanças no volume e estado de tensão (McCartney e Parks, 2009).

Os parâmetros relacionados ao líquido que permeia pelo solo são a viscosidade dinâmica do fluido (μ) e o peso específico do fluido (γ_w). Quanto às características do solo que afetam sua condutividade hidráulica, tem-se: tamanho das partículas; índice de vazios (relacionado ao tamanho e distribuição dos poros); grau de saturação; textura (relacionada à distribuição do tamanho dos grãos), e composição.

Um aumento no índice de vazios gera aumento no valor da condutividade hidráulica saturada. O diâmetro das partículas é diretamente proporcional ao índice de vazios, assim, quanto maior o diâmetro (solo com partículas mais grossas) maior o índice de vazios e, conseqüentemente, maior a condutividade hidráulica saturada.

As outras características (grau de saturação, textura e composição) são tratadas indiretamente, pois, como todas as cinco estão correlacionadas, é difícil isolar o efeito de cada uma (Lambe *et al.*, 1969).

A textura é a propriedade que indica a distribuição do tamanho dos grãos no solo. Considerando solos de mesmo índice de vazios, o que estiver em estado mais floclado terá maior condutividade hidráulica, o oposto ocorrerá no solo com estado disperso (partículas aproximadamente paralelas). Isso ocorre porque no estado disperso a tortuosidade do caminho percorrido pelo líquido, considerando fluxo normal às partículas, é maior. No solo floclado há canais mais largos disponíveis ao fluxo, resultando em maior facilidade de percolação do líquido, e, conseqüentemente, maior condutividade

hidráulica do solo. A estrutura floclada aparece em solos compactados secos, já a estrutura dispersa que leva a menor valor de K , aparece em solos compactados na umidade ótima de compactação (Pinto, 2002).

A influência da composição no coeficiente de permeabilidade não é muito importante no que diz respeito a areias e siltes. Mas, em argilas a composição afeta de maneira significativa o valor de K , principalmente, devido à presença de diferentes íons em diferentes solos argilosos (Lambe *et al.*, 1969).

Quanto ao grau de saturação do solo, para um mesmo solo, a condutividade hidráulica será maior se o solo estiver saturado do que se estiver não saturado. Pois, na condição de não saturação, existem bolsas de ar remanescentes após a percolação, em virtude da tensão superficial da água, que constituem obstáculos ao fluxo de água.

Quando o solo está saturado todos os poros estão preenchidos com água e a conduzem, a fase água é contínua e a condutividade hidráulica será máxima. Quando o solo se torna não saturado, alguns destes poros ficam preenchidos com ar diminuindo a área de condução de água, e conseqüentemente, reduzindo sua condutividade hidráulica.

A variação da condutividade hidráulica com o grau de saturação depende das propriedades geométricas dos canais através dos quais a água se move. Os primeiros poros a se esvaziarem na dessaturação são os grandes poros, ficando o fluxo cada vez mais restrito aos poros menores.

Dessa maneira, solos que apresentem canais de fluxo maiores (solos granulares) tendem a drenar mais rapidamente, acarretando em uma queda mais acentuada no valor da condutividade não saturada com a diminuição do grau de saturação do que em solos finos, que apresentam grande quantidade de microporos. Os microporos retêm água por força de capilaridade mantendo o fluxo contínuo nestes pequenos canais. O resultado é uma queda mais suave no valor de condutividade hidráulica não saturada com a redução do grau de saturação em solos finos quando comparado aos granulares. Assim, para condições de baixa saturação solos finos possuem maior condutividade hidráulica não saturada do que solos granulares (Figura 2.9). Este fato rege o princípio das barreiras capilares e anisotrópicas utilizadas como coberturas impermeabilizantes de aterros sanitários.

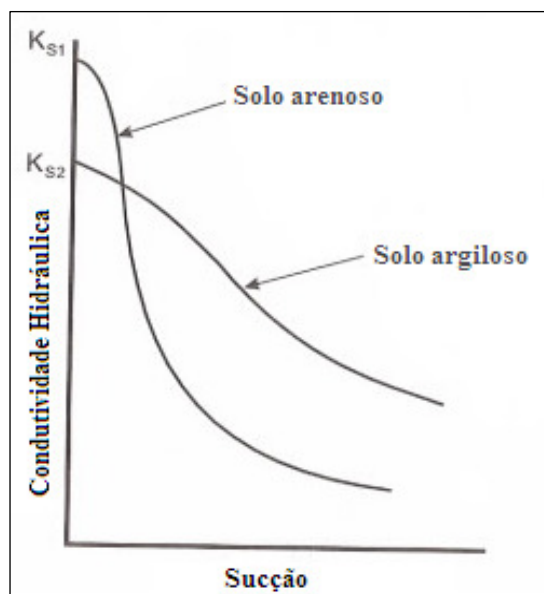


FIGURA 2.9 – FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA PARA SOLO ARENOSO E ARGILOSO.

Fonte: Adaptado de Hillel (1998).

Neste sentido, o índice de vazios e a textura do solo influenciam o valor da condutividade hidráulica de maneiras diferentes quando se compara fluxo saturado e não saturado. No primeiro caso (condição saturada), um grande índice de vazios e a presença de poros largos garantem alta condutividade hidráulica saturada. No segundo caso (condição não saturada), quando maior o índice de vazios e o tamanho dos poros mais facilmente estes são drenados, facilitando a entrada de ar no solo e reduzindo a área de fluxo contínuo, ou seja, reduzindo a condutividade hidráulica,

A Tabela 2.3 indica uma classificação para os solos em relação ao valor de sua condutividade hidráulica, segundo Lambe *et al.* (1969).

TABELA 2.3 – CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS DE ACORDO COM A SUA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.

Grau de permeabilidade	Valor de K_{sat} (m/s)
Alto	Acima de 10^{-3}
Médio	$10^{-3} - 10^{-5}$
Baixo	$10^{-5} - 10^{-7}$
Muito baixo	$10^{-7} - 10^{-9}$
Praticamente impermeável	Abaixo de 10^{-9}

Fonte: Adaptado de Lambe *et al.* (1969).

A Tabela 2.4 apresenta alguns valores típicos de condutividade hidráulica saturada para alguns solos. Pode-se visualizar que solos mais grossos (areias – com partículas e poros maiores) possuem maior coeficiente de permeabilidade do que solos mais finos (argilas).

TABELA 2.4 – CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS DE ACORDO COM A SUA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.

Tipo de solo	K_{sat} (m/s)
Argilas	$<10^{-9}$
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

Fonte: Adaptado de Pinto (2002).

Assim como a CRUS, a Função-K também é caracterizada pela histerese. Portanto, o processo de secagem ou umedecimento altera a magnitude da condutividade hidráulica estimada. Para determinado valor de sucção a condutividade hidráulica será maior durante a secagem do que durante o umedecimento.

A função de condutividade hidráulica reflete o decréscimo nos caminhos disponíveis para fluxo à medida que o solo perde umidade. Para condições em que a fase líquida de um solo não é contínua, a migração de água ocorre principalmente através do transporte de vapor por difusão. Neste caso, a aplicação de gradiente hidráulico não produzirá fluxo e a proporcionalidade entre gradiente hidráulico e taxa de fluxo de líquido deixa de existir, ou seja, a função de condutividade hidráulica deixa de ter relevância física.

A fronteira entre predomínio de transporte da fase líquida ou de vapor é de difícil visualização. A avaliação da CRUS e Funções-K experimentais indica que esta fronteira deve ocorrer na vizinhança da sucção em que a CRUS começa a se achatar para fora com o aumento da sucção (McCartney e Parks, 2009). De acordo com Zornberg e McCartney (2010), esta fronteira deve ocorrer na vizinhança do valor de sucção para o qual a inclinação da CRUS começa a decrescer. Considerando a Figura 2.10 como exemplo, segundo

estes autores, a fronteira entre predomínio de fluxo líquido e de vapor fica entorno de 200 kPa.

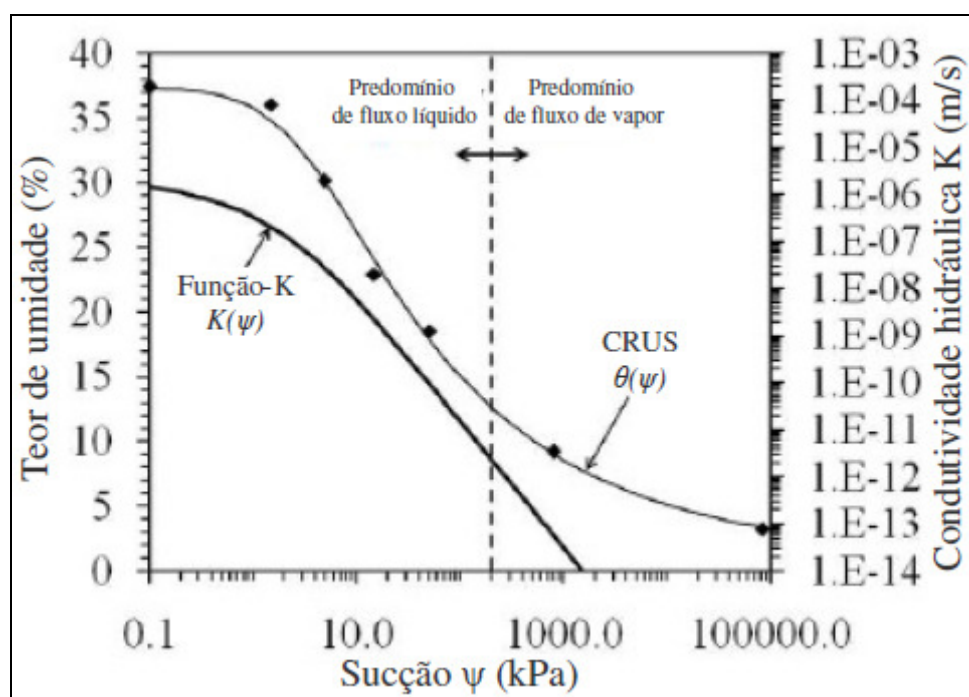


FIGURA 2.10 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO (CRUS) E CURVA DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (FUNÇÃO-K) COM INDICAÇÃO DA FRONTEIRA ENTRE PREDOMÍNIO DE TRANSPORTE LÍQUIDO E DE VAPOR.

Fonte: Zornberg e McCartney (2010).

Feitas estas considerações teóricas fica claro que para analisar o fluxo de água através de um solo não saturado é preciso, primeiramente, definir a curva de retenção de umidade do solo (CRUS) e sua função de condutividade.

Apesar de tratarmos de conceitos básicos e bem consolidados na teoria a respeito de fluxo não saturado, as informações apresentadas neste item são essenciais para entendimento dos métodos de determinação da condutividade hidráulica e suas limitações.

2.2 FLUXO EM MEIO POROSO SUBMETIDO A CAMPO GRAVITACIONAL ACELERADO

O fluxo de água em centrífuga é dirigido também por um gradiente de carga hidráulica. O componente de carga para fluxo centrífugo será diferente daquele sob gravidade natural dado pela Equação 2.24. Em fluxo submetido à aceleração centrípeta tem-se:

$$h_m = -\frac{1}{2}\omega^2 r^2 - \frac{\psi_m}{\rho_w g} \quad (2.30)$$

Onde h_m corresponde à carga hidráulica em determinado ponto do solo submetido à aceleração maior do que a da gravidade. O subscrito m é usado para diferenciar as variáveis aplicadas para fluxo sob gravidade normal (sem subscrito) das variáveis para fluxo sob aceleração centrípeta, o qual pode ser considerado um modelo para avaliação do fluxo real (gravidade normal). ω é a velocidade angular da centrífuga e r é a distância do eixo da centrífuga ao volume de controle:

$$r = r_0 - z_m \quad (2.31)$$

Sendo r_0 a distância do eixo da centrífuga à referência usada para definir a energia potencial do fluido (ou seja, $z = 0$ na base do modelo).

A Figura 2.11 indica as variáveis associadas ao fluxo em meio poroso submetido a campo gravitacional acelerado.

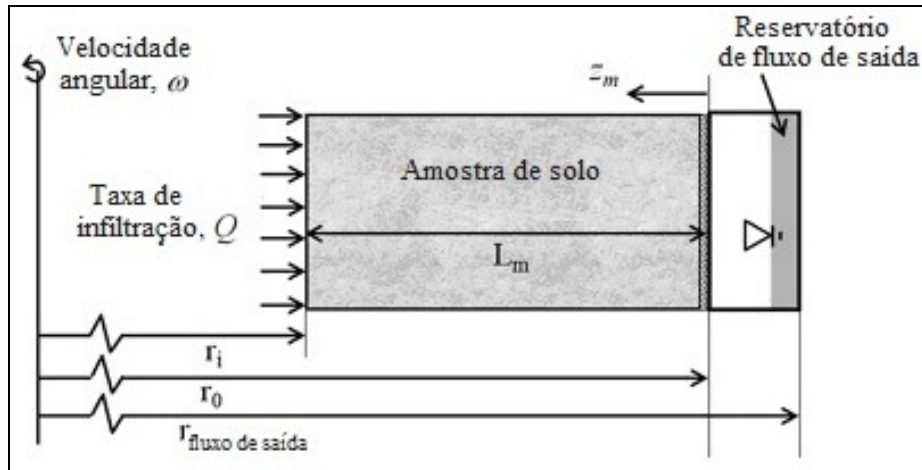


FIGURA 2.11 – PERMEÂMETRO CENTRÍFUGO.

Fonte: Adaptado de Zornberg e McCartney (2010).

O primeiro termo da Equação 2.30 é negativo, pois a carga potencial aumenta na direção oposta a aceleração centrípeta a qual age no sentido do raio. A velocidade de descarga a ser obtida usando o potencial de fluido definido pela equação anterior será positiva na direção de z_m , ou seja, na direção oposta ao raio. A velocidade de percolação é desprezível e o componente de energia cinética da equação pode ser desprezado caso não ocorra fluxo turbulento durante o ensaio em centrífuga.

Assim, para o caso centrífugo, em condição não saturada, a lei de Buckingham-Darcy toma a seguinte forma:

$$v_m = -\frac{K(\psi)}{\rho_w g} \left[\frac{d\psi_m}{dz_m} - \rho_w \omega^2 (r_0 - z_m) \right] \quad (2.32)$$

Segundo Nimmo *et al.* (1987), a lei de Darcy é válida para fluxo de água através do solo em uma centrífuga sob aceleração abaixo de 1600 vezes a aceleração gravitacional.

A aceleração centrípeta é dada por:

$$a_c = \omega^2 r = N_r g \quad (2.33)$$

N_r é a razão entre a aceleração centrípeta e a aceleração da gravidade a uma distância r a partir do eixo da centrífuga.

$$N_r = \frac{\omega^2}{g}(r_0 - z_m) \quad (2.34)$$

Considerando o volume de controle apresentado na Figura 2.12, o princípio da continuidade (Equação 2.25) e a validade da lei de Darcy (Equação 2.32), obtém-se a equação governante para fluxo em centrífuga.

$$\frac{\partial}{\partial z_m} \left[-K(\psi) \left(\frac{\omega^2(r_0 - z_m)}{g} - \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi_m}{\partial z_m} \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.35)$$

Aplicando a derivada inicial para cada termo da equação, utilizando a regra da cadeia, tem-se:

$$\frac{\partial K(\psi)}{\partial z} \left[\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\omega^2(r_0 - z)}{g} \right] + K(\psi) \frac{\omega^2}{g} + \frac{K(\psi)}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.36)$$

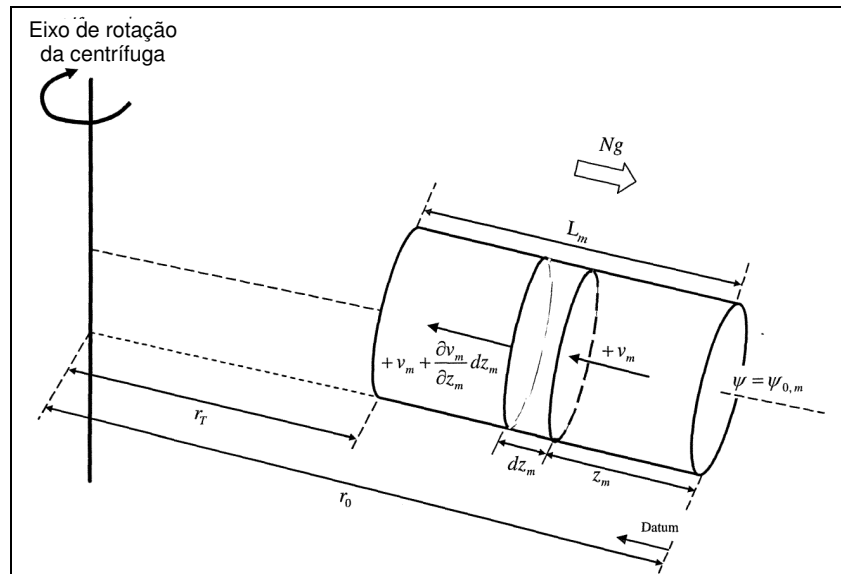


FIGURA 2.12 – FLUXO ATRAVÉS DE UM VOLUME DE CONTROLE EM UM MODELO CENTRÍFUGO.

Fonte: Adaptado de Dell'Avanzi *et. al.* (2004).

Considerando a relação entre sucção e umidade dada pela curva de retenção de umidade do solo:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \theta} \left\{ \frac{\partial K(\psi)}{\partial z} \left[-\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\omega^2 (r_0 - z)}{g} \right] - K(\psi) \frac{\omega^2}{g} - \frac{K(\psi)}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right\} = \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (2.37)$$

A derivada $\partial \theta / \partial t$ é igual a zero se o meio não saturado não passar por mudanças de volume com o tempo e a velocidade de percolação atingir o estado permanente. Para solo homogêneo, não saturado, com volume constante ao longo do tempo e fluxo em estado permanente sob campo gravitacional acelerado:

$$\frac{\partial K(\psi)}{\partial z} \left[\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\omega^2 (r_0 - z)}{g} \right] + K(\psi) \frac{\omega^2}{g} + \frac{K(\psi)}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.38)$$

Rearranjando para evidenciar a diferencial do perfil de sucção, tem-se:

$$\frac{\partial^2 \psi_m}{\partial z_m^2} = \rho_w g v_m \frac{\partial [1/K(\psi)]}{\partial \psi_m} \frac{\partial \psi_m}{\partial z_m} - \rho_w \omega^2 \quad (2.39)$$

Para solo homogêneo, saturado, com volume constante ao longo do tempo e fluxo em estado permanente:

$$\frac{\partial}{\partial z_m} \left[-\frac{K_{sat}}{\rho_w g} \left(\rho_w \omega^2 (r_0 - z_m) - \frac{\partial \psi_m}{\partial z_m} \right) \right] = 0 \quad (2.40)$$

Rearranjando para evidenciar a diferencial do perfil de sucção, obtém-se:

$$\frac{\partial^2 \psi_m}{\partial z_m^2} = -\rho_w \omega^2 \quad (2.41)$$

A utilização de centrífuga em problemas relacionados a fluxo em solos não saturados pode estar voltada tanto à modelagem de fluxo quanto à determinação da condutividade hidráulica (Função-K) do solo não saturado. No primeiro caso devem ser considerados os fatores de escala para garantir a similitude entre modelo e protótipo. Segundo Dell'Avanzi *et al.* (2004), para condições centrífugas que levem a um campo de aceleração aproximadamente uniforme (fator de uniformidade unitário), observa-se que o perfil de sucção no protótipo é igual ao do modelo, enquanto que a velocidade de descarga é propriamente escalada por $1/N$ e o tempo por N^2 , onde N é a razão de aceleração média entre modelo e protótipo.

O fator de uniformidade do campo de aceleração descreve a conformação geométrica entre modelo e protótipo. Para modelos suficientemente pequenos ($r_0/L_m > 10$) o fator de uniformidade é aproximadamente constante para qualquer ponto do modelo, conforme figura a seguir (Dell'Avanzi *et al.*, 2004)

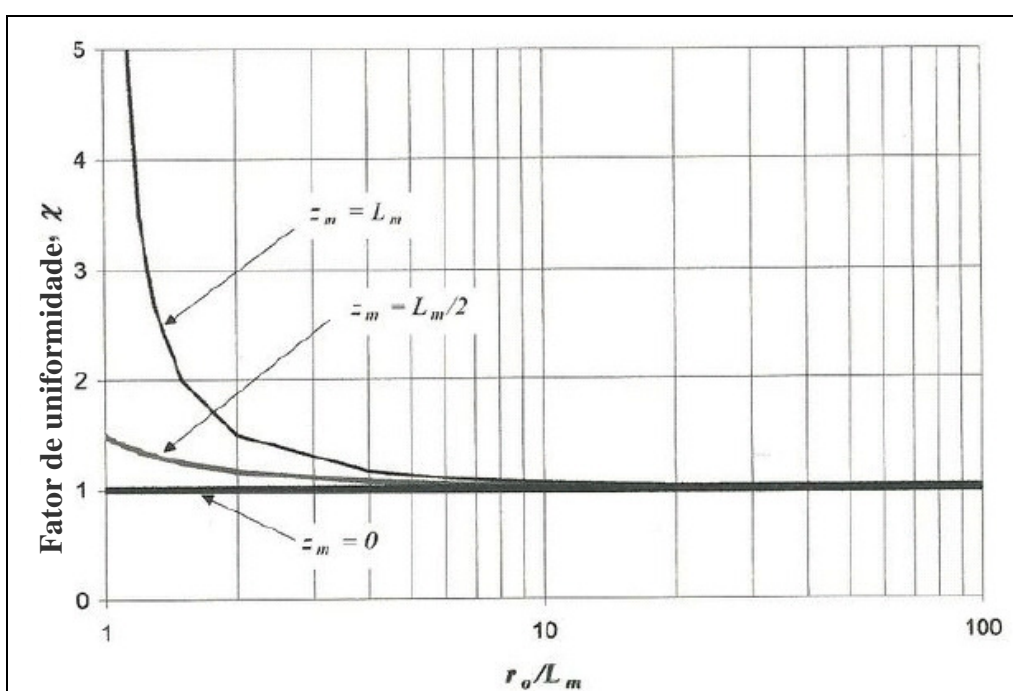


FIGURA 2.13 - FATOR DE UNIFORMIDADE EM UM MODELO EM CENTRÍFUGA.

Fonte: Dell'Avanzi (2004).

No caso de campo de aceleração não uniforme, os fatores de escala devem ser definidos como função do raio da centrífuga e comprimento do

modelo. Desse fato, conclui-se que para aplicações em simulação de fluxo em um protótipo deve-se priorizar a utilização de amostras pequenas em relação ao braço da centrífuga.

No entanto, caso o objetivo maior seja o de estimar a condutividade hidráulica não saturada do solo devem ser utilizadas amostras grandes, nas quais é possível obter uma região bem definida de gradiente de sucção nulo ao longo do comprimento da amostra.

2.3 MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Com base na teoria envolvendo o fluxo em solos não saturados e em dados empíricos foram desenvolvidos vários métodos para determinação da Função-K. Estes podem ser divididos em experimentais e modelos preditivos. Os métodos experimentais podem ser laboratoriais ou de campo. A maioria dos métodos laboratoriais envolve a utilização de permeâmetros. Os modelos preditivos envolvem relações empíricas entre a função condutividade e a curva de retenção de umidade do solo (CRUS) ou suas propriedades volume-massa (Fredlund e Rahardjo, 1993).

2.3.1 Modelos preditivos e descritivos

Segundo McCartney e Parks (2009), apesar de muitos ensaios terem sido propostos para a determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados (ensaio de coluna, fluxo de saída, permeâmetro centrífugo e vários outros) seus usos estão restritos tipicamente ao meio acadêmico, havendo apenas um método normatizado (ASTM D6527). Isso decorre do fato de que estimativas confiáveis da condutividade hidráulica não saturada são especialmente difíceis de obter, em parte devido à variabilidade em campo e ao tempo e custos altos que a medição deste parâmetro envolve.

Por estas razões, na prática, ao invés de determinações experimentais, são utilizados modelos estatísticos baseados na distribuição do tamanho dos poros para prever a Função-K a partir do formato da CRUS. Muitos destes métodos são resumidos por Leong e Rahardjo (1997). Estas abordagens

assumem que o solo se constitui em uma série de poros interconectados cuja distribuição de tamanhos é caracterizada pelo formato da CRUS.

Existem três tipos de modelos para funções de condutividade hidráulica: equações empíricas (Gardner, 1958), modelos macroscópicos e modelos estatísticos (Childs and Collis-George 1950; Burdine 1953; Brooks e Corey, 1964; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980; Fredlund, 1994) (Leong e Rahardjo, 1997). Estas categorias indicam o grau de sofisticação teórica aplicado a cada método, sendo os modelos estatísticos os mais sofisticados (Mualem, 1986). A Tabela 2.5 apresenta alguns modelos que descrevem a função de condutividade hidráulica de solos não saturados.

TABELA 2.5 – MODELOS PARA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.

Autores	Equação do modelo	Parâmetros
Richards (1931)	$K(\psi) = a\psi + b$	a e b : parâmetros de ajuste
Gardner (1958)	$K(\psi) = K_{sat} e^{-a\psi}$	a : parâmetro de ajuste (relacionado ao inverso do valor de entrada de entrada de ar)
Brooks e Corey (1964)	$K(\psi) = K_{sat}$, para $\psi \leq \psi_b$ $K(\psi) = K_{sat} \left(\frac{\psi}{\psi_b} \right)^{-n}$, para $\psi \geq \psi_b$	ψ_b : valor de entrada de ar n : parâmetro de ajuste
Campbell (1974)	$K(\psi) = K_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^n$	n : parâmetro de ajuste
Van Genuchten (1980) (baseado no modelo de Mualem, 1976)	$K(\psi) = K_{sat} \frac{\left\{ 1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}}$	α, m, n : parâmetros de ajuste $m = 1 - 1/n$
Van Genuchten (1980) (baseado no modelo de Burdine, 1953)	$K(\psi) = K_{sat} \frac{\left\{ 1 - (\alpha\psi)^{n-2} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{2m}}$	α, m, n : parâmetros de ajuste $m = 1 - 2/n$

O modelo preditivo mais utilizado na prática é obtido pela substituição do modelo de van Genuchten (1980), para a CRUS, no modelo de Mualem (1976), para a função de condutividade.

Apesar de várias relações para a Função-K terem sido propostas por diferentes autores, segundo Hillel (1998), o coeficiente de permeabilidade é melhor obtido a partir de medidas diretas (experimentais) pois não há predição

teórica comprovada. De acordo com McCartney e Parks (2009), o uso de modelos preditivos para estimativa da função de condutividade hidráulica pode levar a erros de uma a quatro ordens de magnitude, com as maiores discrepâncias ocorrendo em baixas umidades.

Dell'Avanzi (2004) comparou as curvas de condutividade do melhor ajuste aos dados experimentais de uma areia obtidos em centrífuga com o ajuste pelo modelo de Mualem-van Genuchten e conclui que a Função-K estimada pelo modelo pode diferir consideravelmente das condutividades medidas experimentalmente. Segundo o autor, esta diferença aumenta à medida que a umidade volumétrica do solo decresce. A análise indica que a acurácia em prever a Função-K depende da definição adequada da umidade residual.

Já Zornberg e McCartney (2010) identificaram que a Função-K, encontrada para uma argila compactada de baixa plasticidade por ensaios em centrífuga, apresenta a mesma forma que a função obtida por meio da relação preditiva, apesar das Funções-K medida e prevista diferirem por duas ordens de magnitude para baixos valores de umidade volumétrica.

Estes resultados enfatizam a importância da determinação experimental da função de condutividade hidráulica ao invés de se confiar apenas em relações preditivas.

Os modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner serão detalhados a seguir em vista de sua maior relevância para a pesquisa em questão. Segundo Prevedello (1996), o método indireto proposto por van Genuchten é a alternativa mais prática para a determinação da condutividade hidráulica não saturada. No entanto, deve-se levar em conta o fato de que o resultado final é uma estimativa indireta da condutividade hidráulica não saturada do solo.

O método indireto de Mualem-van Genuchten estima a condutividade hidráulica não saturada de um solo com base no valor de sua condutividade saturada, na sua curva de retenção e nos valores de umidade residual e umidade de saturação.

Mualem (1976) derivou um modelo para previsão da condutividade hidráulica a partir do conhecimento da curva de retenção de umidade do solo (CRUS) e da condutividade na saturação. A equação proposta por Mualem consiste em uma fórmula integral simples (Equação 2.42) que permite a

obtenção de expressões analíticas contanto que esteja disponível uma equação adequada para a CRUS.

$$K = \Theta^{1/2} \left[\int_0^\Theta \frac{1}{h(x)} dx \bigg/ \int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx \right]^2 \quad (2.42)$$

Sendo que $\Theta = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}}$ corresponde à umidade volumétrica adimensional, θ_{sat} é a umidade de saturação, θ_{res} umidade residual e θ a umidade do solo para certo h ou ψ .

Van Genuchten (1980) obteve uma expressão analítica para a Função-K com base no modelo de Mualem e na proposição de uma equação contínua para a CRUS (Equação 2.19).

A condutividade hidráulica pode, então, ser estimada pela função de Mualem-van Genuchten:

$$K(\theta) = K_{sat} \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right]^{1-\frac{1}{n}} \right\}^2 \quad (2.43)$$

Onde K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada do solo.

A Figura 2.14 indica as curvas obtidas por van Genuchten (1980) com base nestas equações.

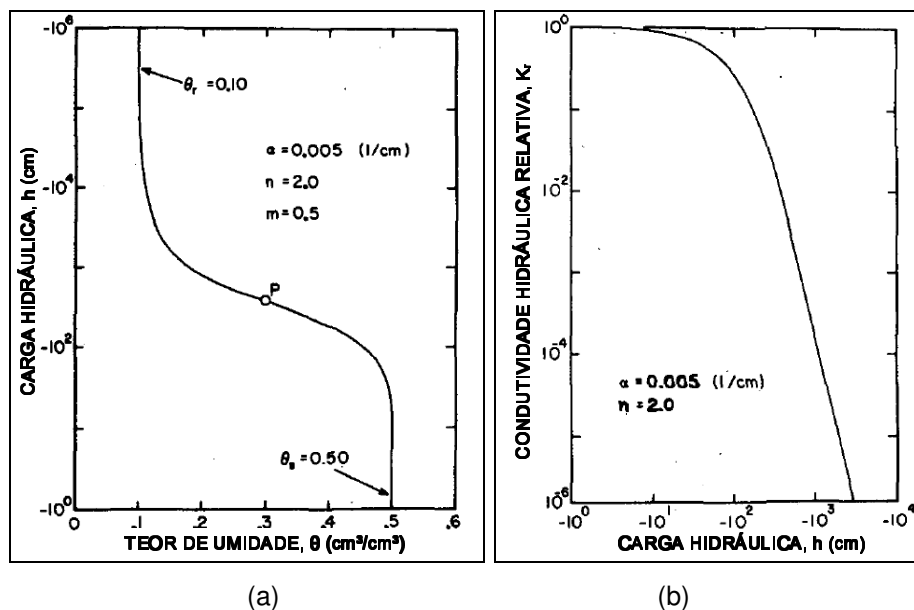


FIGURA 2.14 - CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE (a) E DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (b) SEGUNDO EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN (1980).

Fonte: van Genuchten (1980).

Para estimativa da função condutividade hidráulica por este método devem estar disponíveis dados experimentais da CRUS (ψ e θ). Os dados experimentais devem ser ajustados à função de van Genuchten (1980) para obtenção dos quatro parâmetros independentes da equação (α , n , θ_{sat} e θ_{res}). Destes parâmetros, a umidade residual é a mais difícil de obter.

De acordo com o método proposto por van Genuchten (1980), a obtenção dos parâmetros α e n é realizada considerando a inclinação S dos dados experimentais no ponto médio (ponto P, na Figura 2.14) entre a umidade residual e a umidade de saturação, determinada graficamente. O procedimento completo é descrito em van Genuchten (1980).

Fredlund e Rahardjo (1993) e Leong e Rahardjo (1997) apresentam metodologias para definição de θ_{res} . Ela pode ser medida experimentalmente pela determinação do conteúdo de água em solo muito seco. Em casos onde não é possível uma medida direta, pode ser estimada pela extrapolação dos dados disponíveis da CRUS até umidade reduzidas. Outra abordagem seria a utilização do método dos mínimos quadrados (considerando ajustes não lineares) para ajuste da curva com estimativa simultânea de α , n , θ_{res} e θ_{sat} . A vantagem desta última forma é que todos os dados experimentais podem ser

utilizados no procedimento de estimativa dos parâmetros e não apenas um ponto (van Genuchten, 1980).

A Função-K determinada por Gardner (1958) é dada pela seguinte equação:

$$K(\psi) = K_{sat} e^{-\alpha\psi} \quad (2.44)$$

A função de decaimento exponencial de Gardner (1958) possibilita a obtenção de soluções analíticas para o problema de fluxo permanente apresentada por Dell'Avanzi *et al.* (2004) e Dell'Avanzi *et al.* (2006), e transiente, apresentada por Srivastava e Yeh (1991).

Partindo da Equação 2.21, considerando estado permanente de fluxo e aplicando as condições de contorno de sucção imposta na base (ψ_0 , em $z = 0$) e velocidade de descarga imposta no topo (v), obtém-se, para fluxo sob aceleração gravitacional natural:

$$\psi = -\frac{1}{a} \ln \left[e^{\left(\ln \left| \frac{v}{K_{sat}} + e^{-a\psi_0} \right| - a\rho_w g z \right)} - \frac{v}{K_{sat}} \right], \text{ para } \frac{v}{K_{sat}} + e^{-a\psi_0} > 0 \quad (2.45a)$$

$$\psi = -\frac{1}{a} \ln \left[-e^{\left(\ln \left| \frac{v}{K_{sat}} + e^{-a\psi_0} \right| - a\rho_w g z \right)} - \frac{v}{K_{sat}} \right], \text{ para } \frac{v}{K_{sat}} + e^{-a\psi_0} < 0 \quad (2.45b)$$

Para fluxo sobre campo gravitacional acelerado (Figura 2.12) obtém-se:

$$\psi = -\frac{1}{a} \ln \left[e^{\left(\ln \left| \frac{v}{N_r K_{sat}} + e^{-a\psi_0} \right| - a\rho_w \omega^2 z \left(r_0 - \frac{z}{2} \right) \right)} - \frac{v}{N_r K_{sat}} \right], \text{ para } \frac{v}{N_r K_{sat}} + e^{-a\psi_0} > 0 \quad (2.46a)$$

$$\psi = -\frac{1}{a} \ln \left[-e^{\left(\ln \left| \frac{v}{N_r K_{sat}} + e^{-a\psi_0} \right| - a\rho_w \omega^2 z \left(r_0 - \frac{z}{2} \right) \right)} - \frac{v}{N_r K_{sat}} \right], \text{ para } \frac{v}{N_r K_{sat}} + e^{-a\psi_0} < 0 \quad (2.46b)$$

2.3.2 Métodos experimentais

No que diz respeito à determinação direta da condutividade hidráulica não saturada, há uma grande quantidade de métodos, tanto de campo quanto laboratoriais. Estes métodos podem ser divididos em dois grandes grupos: métodos transientes e métodos permanentes.

Prevedello (1996) descreve um método permanente, o método de Richards (ou tradicional, como intitulado por outros autores), três métodos transientes: fluxo de saída (proposto por Gardner, em 1956), fluxo de entrada (ou Método de Bruce-Klute) e perfil instantâneo, além dos métodos indiretos da curva de retenção e da condutividade hidráulica na saturação.

Benson e Gribb (1997) descrevem quatorze métodos para a determinação da condutividade hidráulica não saturada, sendo dez métodos laboratoriais e quatro de campo, incluindo os descritos por Prevedello (1996). O número de métodos permanentes é significativamente menor do que o número de métodos transientes, isso ocorre pelo fato de que os últimos requerem menos tempo de ensaio. Apesar disto, segundo os autores, a análise dos dados transientes é geralmente mais complicada que a dos permanentes.

Masrouri *et al.* (2008) sintetiza o estado da arte das variadas técnicas de ensaios laboratoriais disponíveis, até então, para determinação das propriedades hidráulicas de solos não saturados (CRUS e Função-K).

A Tabela 2.6 apresenta uma síntese dos métodos experimentais existentes atualmente, segundo Masrouri *et al.* (2008) e Benson e Gribb (1997). Os métodos transientes são de maior interesse para o projeto em questão visto que é esta a condição de fluxo inerente aos métodos experimentais que foram executados.

A maioria dos métodos permanentes para determinação da condutividade hidráulica não saturada é similar aos métodos usados para determinação de condutividade hidráulica saturada. Os ensaios consistem na aplicação de fluxo ou gradiente hidráulico constante ao solo. No primeiro caso (fluxo constante), mede-se a sucção e, no segundo (gradiente hidráulico constante), mede-se a taxa de fluxo, para, então, determinar-se a condutividade hidráulica não saturada por meio da lei de Darcy.

TABELA 2.6 – ALGUNS MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.

Regime de fluxo	Método	Autores
PERMANENTE	Tradicional	Richards (1931)
	Centrífugo	Nimmo <i>et al.</i> (1987), 1992; Conca e Wright (1992); Dell'Avanzi (2004); Dell'Avanzi (2006); McCartney e Zorenberg (2005); Zornberg e McCartney (2010); McCartney e Zornberg (2010).
	Fluxo constante	Olsen (1966); Olsen <i>et al.</i> (1985); Aiban e Znidarcic (1989); Znidarcic <i>et al.</i> (1991); Bicalho <i>et al.</i> (2000); Likos <i>et al.</i> (2005)
TRANSIENTE	Sorção	Klute e Dirksen (1986)
	Absorção	Bruce e Klute (1956)
	Térmico	Globus e Gee (1995)
	Fluxo de saída	Gardner (1956); Gardner (1962); Doering (1965); Eching <i>et al.</i> (1994); Salehzadeh e Demond (1994)
	Perfil instantâneo	Richards and Weeks 1953; Bruce and Klute 1956; Watson 1966; Wind 1968; Hamilton <i>et al.</i> 1981; Daniel 1983; Chiu and Shackelford 1998
	Centrífuga de pequena escala*	Reis <i>et al.</i> (2011); Sterck (2011)

Fonte: Baseado em informações de Benson e Gribb (1997) e Masrouri *et al.* (2008); * Reis *et al.* (2011) e Sterck (2011).

O principal método de fluxo permanente, a partir do qual os demais derivam, consiste no método tradicional ou de Richards. A determinação da Função-K por este método é feita colocando uma coluna de solo entre duas placas porosas e mantendo fluxo constante entre elas. Usa-se um frasco de Mariotte para garantir a diferença de carga Δh entre os extremos da coluna. Quando o nível do frasco se torna constante, estabelece-se o regime permanente e a condutividade hidráulica pode ser determinada diretamente pela equação de Buckingham-Darcy, na seguinte forma:

$$K(\theta) = v_z \left(\frac{L}{\Delta h} \right) \quad (2.47)$$

Onde L é o comprimento da coluna de solo, Δh é a variação de carga ao longo da coluna e v_z é densidade de fluxo (ou velocidade de descarga) permanente.

O valor de K obtido é relacionado à sucção média na coluna. O valor de umidade correspondente pode ser obtido pela curva de retenção do solo.

Variando Δh , e consequentemente ψ , e calculando novos $K(\psi)$ ou $K(\theta)$, obtém-se a relação entre condutividade hidráulica não saturada e sucção, ou umidade, para o solo em questão.

A maior vantagem deste método é a obtenção de uma medida acurada da condutividade hidráulica, utilizando uma análise simples, sem considerações de difícil verificação. Como desvantagens, podem ser citadas: a dificuldade de medida acurada da velocidade de descarga, por apresentar valores reduzidos; o longo período requerido para obtenção da condição permanente; a possibilidade de perda de carga devido à impedância das placas (oposição ao fluxo) e a heterogeneidade da condutividade na amostra (a condutividade média não corresponde necessariamente à sucção média na coluna). Para solucionar algumas destas complicações recomenda-se manter o valor do gradiente hidráulico o menor possível e, ao mesmo tempo, manter fluxos mensuráveis (Benson e Gribb, 1997).

Ensaio com fluxo em condições permanentes demandam muito tempo, mas segundo Klute e Dirksen (1982), Nimmo *et al.* (1987), Prevedello (1996), Benson e Gribb (1997), Masrouri *et al.* (2008) e vários outros autores, apresentam melhores resultados quando comparados aos métodos transientes existentes.

Na condição de fluxo transiente, a condutividade hidráulica é determinada usando soluções analíticas que descrevam o fluxo transiente ou, aplicando a lei de Darcy em passos de tempo, durante os quais se considera que as condições são aproximadamente permanentes.

Há um grande número de métodos transientes, entre eles estão os métodos da absorção de Bruce-Klute (ou técnica do fluxo de entrada), da ascensão capilar; de fluxo de saída (passo único, passo contínuo ou múltiplos passos); térmico e do perfil instantâneo. Detalhes destes métodos são apresentados em Benson e Gribb (1997).

Dentre os métodos citados, conforme Benson e Gribb (1997) e Prevedello (1996), o que leva à medida mais acurada de condutividade hidráulica não saturada é o método tradicional permanente desenvolvido por Richards. Apesar disto, este método é caro e requer muito tempo, além de haver dificuldades na medição acurada de fluxos reduzidos.

Prevedello (1996) adverte que, apesar das determinações serem realizadas em condições controladas, as medidas obtidas em laboratório têm pouca correlação com as encontradas em campo. As medidas laboratoriais são mais fáceis de serem realizadas do que as de campo, mas há dificuldades como a falta de representatividade da amostra, principalmente em se tratando de solo heterogêneo, estratificado ou fissurado. Além disso, pode haver danificação da amostra durante o procedimento de amostragem.

Os resultados laboratoriais são normalmente mais baixos do que os de campo. Lange *et al.* (2002) determinou a condutividade hidráulica saturada de um solo para cobertura de aterro sanitário em laboratório e em campo. Em laboratório, obteve uma condutividade hidráulica de $2,0 \times 10^{-5}$ cm/s. Já, em campo, o valor obtido para a condutividade hidráulica, a uma profundidade de 1,70m, foi de $1,16 \times 10^{-3}$ cm/s. Os autores atribuíram a grande diferença entre os resultados à heterogeneidade do solo.

Sempre que possível, deve-se realizar medições de condutividade hidráulica em campo, pois são nestas condições em que o fluxo de interesse ocorrerá. Isto pode ser dificultado pela existência de poucos métodos confiáveis e pelo custo envolvido, que é, normalmente, maior do que no caso de ensaios laboratoriais.

Alguns exemplos de métodos de campo (descritos por Benson e Gribb, 1997) são: método da crosta (*crust method*), método do perfil instantâneo de campo, método do Infiltrômetro de Disco e método do Penetrômetro de Cone (CPT – *Cone Penetrometer*). Além destes, também podem ser realizados ensaios de bombeamento de poços, para determinação da condutividade hidráulica regional de aquíferos e ensaios com permeâmetro de Guelph.

2.3.2.1 Perfil instantâneo

No método do perfil instantâneo, induz-se fluxo transiente em uma coluna de solo e medem-se os perfis transientes de umidade ou sucção, os quais, juntamente com a Lei de Darcy, são usados para determinação da condutividade hidráulica não saturada da amostra de solo. O volume de água de fluxo de um ponto a outro da amostra de solo, em determinado intervalo de tempo, é estimado por meio da variação do perfil de umidade ao longo do tempo. O gradiente hidráulico é determinado com base na variação do perfil de sucção ao longo do tempo.

Há várias maneiras de conduzir um ensaio de condutividade por este método, sendo que as diferenças decorrem principalmente da maneira com que a água é retirada ou adicionada à amostra, como por exemplo: drenagem por gravidade (Watson, 1966), retirada de água por meio da aplicação de sucção (Richards e Weeks, 1953), aplicação de fluxo (Overman e West, 1972; McCartney *et al.*, 2007), evaporação (Wind, 1968; Ayra *et al.*, 1975; Meerdink *et al.*, 1996) e adição lenta de água (Hamilton *et al.*, 1981; Daniel, 1983; Chui e Shackelford, 1998; Vanapalli *et al.*, 2006).

Normalmente, os ensaios são realizados em permeâmetros com parede rígida, verticais ou horizontais. Para medir o perfil de umidade e sucção, são colocadas sondas em diferentes posições no interior do permeâmetro. Para a sucção usam-se tensiômetros. Já, o perfil de umidade é medido por meio de métodos de resistência elétrica ou TDR (*time domain reflectometry*), sendo o último o método mais confiável.

O método do perfil instantâneo também pode ser utilizado diretamente em campo.

2.3.2.2 Fluxo de saída (*outflow methods*)

Os métodos de fluxo de saída são classificados em quatro tipos: múltiplos passos, passo único, direto e contínuo. O procedimento é, tipicamente, conduzido nos mesmos aparatos utilizados para a determinação da curva de retenção (*vaso extrator ou vaso de pressão*).

O método de fluxo de saída de múltiplos passos é o método original de fluxo de saída proposto por Gardner, em 1956. Este método consiste em

aplicar à coluna de solo pequenos incrementos na sucção ($\Delta\psi$) e medir a taxa de fluxo de saída e o fluxo de saída total a cada incremento. Considera-se que $K(\psi)$ é constante para cada incremento $\Delta\psi$ e que a curva de retenção de umidade do solo é linear, sendo descrita por uma função do tipo $\psi = a + b\theta$. A condutividade hidráulica é determinada por meio da equação de Richards transformada para uma equação de difusão.

Os demais métodos de fluxo de saída são variações do método de múltiplos passos. O método do passo único (Gardner, 1962 citado por Benson e Gribb, 1997) determina a difusividade a partir de um incremento único na sucção analisando o perfil de umidade ao longo do tempo.

Pelo método direto com múltiplos passos a condutividade hidráulica é determinada diretamente pela lei de Darcy, aplicando-a a pequenos intervalos de tempo nos quais a sucção é considerada constante ao longo da amostra de solo, principalmente na metade superior desta ($z > L/2$).

Este método apresenta como vantagem, em relação aos métodos de fluxo de saída citados anteriormente, o fato de que a condutividade hidráulica é determinada diretamente e não a partir da difusividade. Além disso, a cada passo de incremento da sucção, vários valores de condutividade podem ser determinados.

No método contínuo, a sucção mátrica é alterada continuamente e não em passos. A coluna de solo é instrumentada com tensiômetros, para permitir a determinação do gradiente hidráulico, o fluxo de saída também é monitorado. A condutividade hidráulica não saturada é determinada aplicando-se a lei de Darcy na base da amostra, onde o fluxo e o gradiente hidráulico são conhecidos. A condutividade hidráulica não saturada obtida corresponde à sucção na base da amostra, a qual é determinada considerando que a carga total durante fluxo transiente é descrita por um polinômio de segunda ordem.

O método não é adequado para solos com alto teor de umidade (próximo à saturação), por apresentar dispersão nos resultados. Além disso, não há dados comparativos relacionando a condutividade hidráulica obtida por este com a obtida por outro método.

2.3.2.3 Centrífuga

Em vista da conveniência de produzir forças muito maiores que a gravitacional, a força centrífuga é vantajosa para determinação das propriedades hidráulicas em muitos sentidos: permite a determinação de baixos valores de K ; acelera o fluxo de água durante o experimento, diminuindo o tempo de ensaio; determinação de uma ampla faixa de valores de umidades e condutividades, além da determinação direta das propriedades de fluxo que em outros casos não seriam distinguidas dos efeitos de vapor e outros fenômenos (Nimmo *et al.*, 2002; van den Berg *et al.*, 2009).

Desde o início do século 20, já se reconhecia as vantagens do uso de centrífugas para acelerar o fluxo em meio poroso e determinar as propriedades hidráulicas do solo. Briggs e McLane (1907) citado por van den Berg (2009) utilizaram centrífuga para tentar definir o conceito de umidade equivalente (um único valor para a capacidade de retenção do solo).

Segundo Nimmo *et al.* (2002), vários autores realizaram experimentos em centrífuga para determinação da CRUS (Gardner, 1937; Russel e Richards, 1938; Hassler e Brunner, 1945; Alemi *et al.*, 1976; Paningbaton, 1980). Os dados de CRUS determinados em centrífugas foram utilizados para estimativa da Função-K através de modelos como de Burdine (1953) e Mualem (1976) citado por van Genuchten (1980), mas esta estimativa não corresponde a determinações de condutividade hidráulica em centrífuga.

Gardner (1937) efetuou ensaios em centrífuga com papel filtro a fim de avaliar o efeito da centrifugação sobre a sucção do solo e concluiu que existe uma relação entre sucção e a gravidade induzida aplicada à amostra.

Corey (1977) realizou ensaio em centrífuga com drenagem livre do solo e verificou que, para cada velocidade de rotação aplicada, a amostra de solo drena até a força capilar se igualar à força centrífuga induzida sobre as moléculas de água.

A partir de 1987, com o trabalho de Nimmo *et al.* (1987) a tecnologia centrífuga passou a ser utilizada como forma de redução no tempo de ensaios de infiltração em condições permanentes para determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados (Nimmo *et al.*, 1987, 1994, 2002; Nimmo e Mello, 1991; Conca e Wright, 1992; ASTM, 2000).

Nimmo *et al.* (1987) e Conca e Wright (1992) mostraram a viabilidade de ensaios centrífugos em solos não saturados, definiram os procedimentos para determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados e validaram experimentalmente o uso da lei de Darcy em campos centrífugos. A centrifugação havia sido usada anteriormente em várias aplicações de fluxo em meio poroso, mas não em conexão com medidas permanentes de permeabilidade.

2.3.2.3.1 Métodos permanentes

Em experimentos permanentes com centrífuga a amostra e os fluidos são sujeitos a aceleração centrífuga constante. Os ensaios tipicamente consistem em centrifugação de amostras em diferentes velocidades angulares ou taxas de fluxo, estabelecimento do estado permanente para cada velocidade, determinação da umidade volumétrica e/ou sucção média na amostra e determinação da condutividade hidráulica a partir da aplicação da lei de Darcy.

A condição de fluxo permanente requer taxa de fluxo constante e força centrífuga constante por um tempo suficiente para que a umidade e o fluxo de água no interior da amostra se mantenham constantes com o tempo. Quando esta condição se satisfaz, a lei de Darcy pode ser usada para relacionar condutividade hidráulica à umidade e sucção para as condições de fluxo estabelecidas. Assume-se que a pressão de ar é equivalente à pressão atmosférica e com isso o potencial de pressão e o potencial mátrico se tornam equivalentes. Para isto deve haver livre movimento do ar pela amostra.

Durante o fluxo permanente a velocidade de descarga imposta se mantém constante com o tempo e elevação. Portanto, como há variação de z_m ao longo da amostra, K também deverá variar. Isto deve ser levado em consideração na interpretação dos resultados obtidos através do permeâmetro centrífugo (Zornberg e McCartney, 2010).

Caso a força centrífuga seja aplicada com uma velocidade de rotação grande o suficiente para assegurar que o gradiente de sucção seja muito menor do que a força centrífuga, qualquer gradiente de sucção que se desenvolver na amostra durante a centrifugação será insignificante, ou seja, o

fluxo será essencialmente decorrente da aplicação de força centrífuga (Figura 2.15). Neste caso, a equação de fluxo (Equação 2.35) pode ser simplificada desconsiderando o gradiente de sucção.

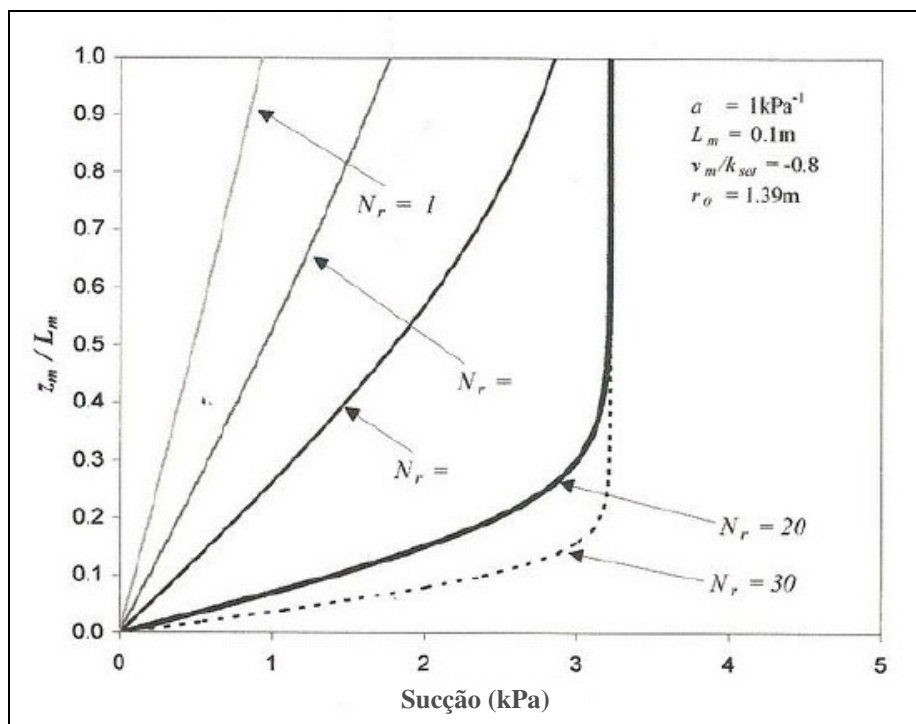


FIGURA 2.15 – PERFIS DE SUCÇÃO PARA FLUXO EM SOLO NÃO SATURADO EM UM MODELO EM CENTRÍFUGA.

Fonte: Dell'Avanzi (2004).

De acordo com Dell'Avanzi (2006), o gradiente de sucção desprezível constitui-se em uma condição favorável para a determinação da condutividade hidráulica não saturada, pois a medição experimental da sucção, nesta região, não é significativamente afetada pela localização precisa do dispositivo de medição de sucção e porque a condutividade não saturada passa a ser diretamente relacionada à velocidade de descarga aplicada (v_m) e inversamente relacionada ao nível de gravidade aplicado (N_r).

$$K(\psi) = -\frac{v_m}{N_r} \quad (2.48)$$

O nível de gravidade se refere a quantas vezes a aceleração centrífuga supera a gravitacional (Equação 2.34).

Dell'Avanzi (2004) demonstrou que para que seja obtida uma região da amostra em que o gradiente de sucção é desprezível, deve ser observada uma razão de aspecto mínima entre o comprimento da amostra de solo e o comprimento do braço da centrífuga da ordem de 1/10, conforme Figura 2.16.

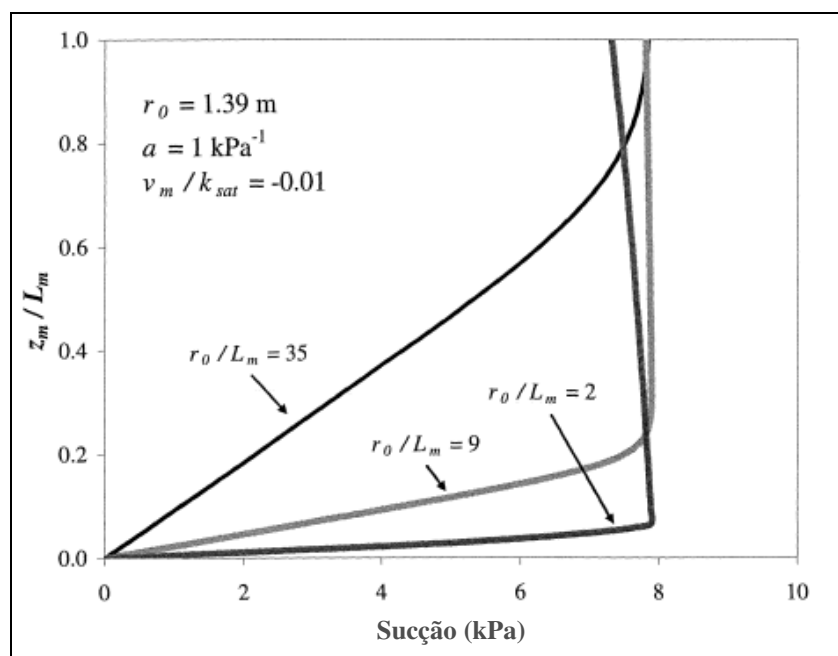


FIGURA 2.16 – INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA AMOSTRA NO PERFIL DE SUCÇÃO DO MODELO CENTRÍFUGO.

Fonte: Dell'Avanzi (2006).

Um valor de sucção aproximadamente constante diferente será obtido para cada valor de v_m o que corresponderá a um valor diferente de K por meio da Equação 2.48. Dessa forma, diferentes pontos da Função-K do solo podem ser obtidos pela simples imposição de diferentes velocidades de descarga.

O conhecimento da condutividade hidráulica saturada anteriormente aos ensaios não saturados é importante pois serve também como indicador do valor máximo de condutividade hidráulica que pode ser medido e permite a escolha apropriada das velocidades e fluxos operacionais da centrífuga (Nimmo *et al.*, 2002). As técnicas disponíveis para determinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) em centrífuga são adaptações dos métodos de carga constante e variável dirigidos pela gravidade.

Nimmo e Mello (1991) derivaram fórmulas para determinação de K_{sat} para carga constante e variável com controle de fluxo interno e Nimmo *et al.*

(2002) para fluxo externo. De acordo com Nimmo e Mello (1991), as medidas podem ser efetuadas com aplicação de força centrífuga de até 1800 vezes a gravidade normal e valores de K_{sat} menores do que 10^{-10} m/s podem ser atingidos. Além disso, para controle de fluxo interno, o método de carga variável apresentou projeto e operação simples e resultados mais acurados do que o método de carga constante (Nimmo e Mello, 1991).

De acordo com a literatura consultada, destacam-se quatro métodos diferentes para determinação experimental permanente da condutividade hidráulica não saturada em centrífuga: controle interno de fluxo (*Internal flow control* – IFC) (Nimmo *et al.*, 1987), aparato de fluxo não saturado (*Unsaturated flow apparatus* – UFA) (Conca e Wright, 1992) e, mais recentemente, a utilização de permeâmetros em centrífugas geotécnicas por Dell’Avanzi (2004), Dell’Avanzi *et al.* (2004), Dell’Avanzi (2006) e Zornberg e McCartney (2010).

O método de controle interno de fluxo utiliza a forma simplificada da lei de Darcy para fluxo centrífugo não saturado (Equação 2.48). Considera-se que o gradiente de sucção radial ($\partial\psi/\partial r$) é desprezível quando comparado ao gradiente centrífugo ($\rho_w \omega^2 r$), pois $\omega > 100 \text{ s}^{-1}$ (Nimmo *et al.*, 1987).

O recipiente da amostra para ensaio consiste em uma centrífuga pequena com reservatórios e placas porosas dispostos como indicado na Figura 2.17. Os reservatórios superpostos são responsáveis pelo suprimento de água para o solo e pelo controle do fluxo e da carga aplicada (controle das condições de contorno).

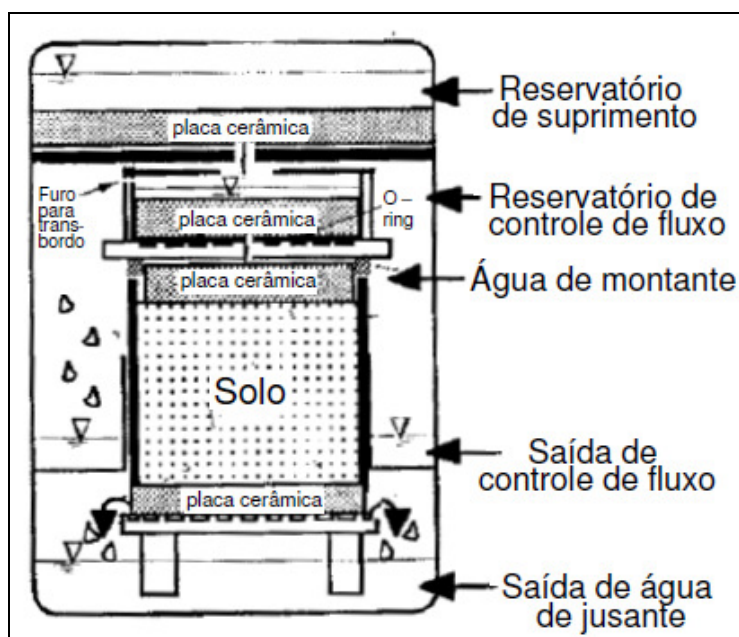


FIGURA 2.17 – RECIPIENTE DA CENTRÍFUGA PARA O MÉTODO IFC.

Fonte: Benson e Gribb (1997).

O fluxo no estado permanente é medido parando a centrífuga de tempo em tempo e pesando a água dos diferentes reservatórios. Para determinar diferentes valores de $K(\psi)$, trocam-se as placas porosas, a elevação da carga d'água e a área de fluxo através da placa porosa central. Placas porosas com condutividades hidráulicas menores são utilizadas para determinar menores condutividades no solo. O aparato é sujeito à aceleração centrífuga de até 2000 g para gerar fluxos mensuráveis até em baixos valores de K (Nimmo *et al.*, 2002).

Uma grande variedade de tipos de centrífugas e rotores pode ser usada na abordagem de controle interno de fluxo. Nimmo *et al.* (1994) realizou ensaio com um recipiente de um litro em uma ultracentrífuga com comprimento de braço de 210 mm. As dimensões da centrífuga são reduzidas, semelhantes a centrífugas médicas.

Nimmo *et al.* (1987) propôs o método centrífugo com controle de fluxo interno para determinação da condutividade hidráulica de solos relativamente secos. Obteve valores de K de até $7,6 \times 10^{-11}$ m/s, com ensaios de algumas horas. Os resultados obtidos pela centrifugação se mostraram consistentes com a lei de Darcy para forças centrífugas variando de 216 a 1650 vezes a força gravitacional normal.

Nimmo *et al.* (1992) propôs uma modificação no método original que permitiu a expansão da faixa de valores de condutividade hidráulica que poderiam ser medidos chegando ao valor de K de $1,1 \times 10^{-11}$ m/s em 6,8% de umidade volumétrica para um solo arenoso.

Dell'Avanzi (2004) indica que este sistema apresenta as desvantagens de necessitar de saturação da placa cerâmica superior para que as estimativas da velocidade de descarga aplicada sejam acuradas; da velocidade de descarga aplicada variar com a gravidade induzida e de requerer a interrupção do ensaio periodicamente para determinar a atingimento de estado permanente. Da mesma forma, Zornberg e McCartney (2010) apontam como desvantagens o fato do equipamento não permitir o controle independente da taxa de infiltração e da velocidade angular e de necessitar da troca das pedras porosas para a aplicação de taxas de infiltração diferentes.

O aparato para fluxo não saturado (Conca e Wright, 1992) consiste em um método centrífugo permanente, padronizado pela ASTM D62527 que requer o uso de centrífuga e rotor específicos. As dimensões do rotor e dos recipientes para amostras do sistema UFA diferem em relação ao IFC. O rotor de centrífuga mais comum para o UFA possui comprimento de braço (distância radial entre o centro de rotação e a base da amostra) de 111,5 mm e armazena dois recipientes que podem conter amostras de comprimento de 49 mm e diâmetro entre 30 e 40 mm.

O modo de fornecimento de água para a amostra também é diferente. Ao invés de fornecer água a cada amostra através de reservatório interno e prato cerâmico (IFC), o suprimento de água é realizado através de bombas externas ligadas por tubos ao rotor do aparato e usando um selo rotativo no interior do rotor. A água bombeada para o rotor a partir de bomba externa é dispersa sobre a amostra usando um dispersor especificamente projetado. Após passar pela amostra a água vai para uma câmara de coleta de fluxo de saída, acoplada ao fundo do recipiente, que contém a amostra de solo. A câmara de fluxo de saída possui marcas de calibração que permitem a determinação do volume de saída, útil para comparação com o fluxo de entrada para estabelecimento de fluxo permanente. A Figura 2.18 mostra os componentes do aparato para fluxo não saturado.

O método UFA pode ser utilizado para amostras de solo, sedimento, rocha, concreto ou qualquer outro meio poroso, especialmente materiais altamente não saturados e relativamente impermeáveis. A faixa de operação de condutividade hidráulica não saturada que pode ser imposta pelo UFA se estende de 10^{-4} cm/s a 10^{-11} cm/s, para condições saturadas pode chegar até 10^{-14} cm/s (Conca e Wright, 1992).

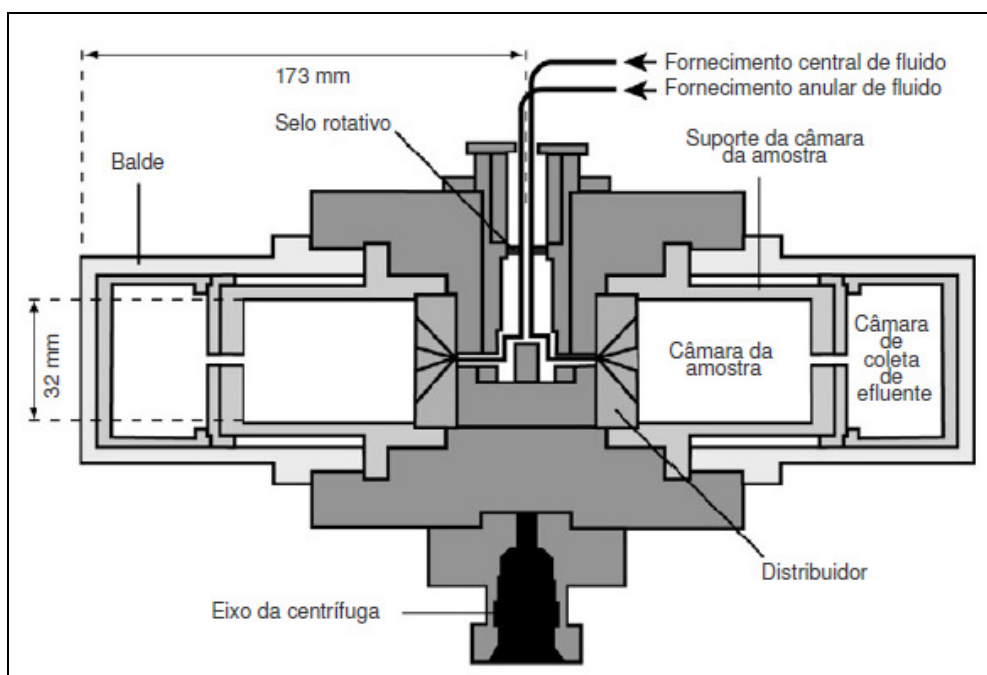


FIGURA 2.18 – SEÇÃO TRANSVERSAL, PERPENDICULAR AO PLANO DE ROTAÇÃO DO APARATO PARA FLUXO NÃO SATURADO

Fonte: van den Berg (2009).

Segundo Dell'Avanzi (2004), a principal vantagem do aparato desenvolvido por Conca e Wright está no fato de permitir o controle da velocidade de descarga independentemente do nível de gravidade aplicado. Em contrapartida, o sistema não apresenta possibilidade de acoplamento de instrumentação na coluna de solo e nem de dispositivo para monitoramento da velocidade de descarga.

Dell'Avanzi (2004) desenvolveu um permeâmetro para uso em centrífuga geotécnica com o intuito de analisar o fluxo em solos não saturados. O equipamento propicia o controle das condições de contorno superior e inferior aplicadas à amostra de solo com a vantagem adicional de permitir o monitoramento da umidade volumétrica ao longo da amostra usando TDR (*time*

domain reflectometry). Para realização de ensaios de condutividade hidráulica não saturada com este equipamento são consideradas as condições de contorno inferior de imposição de determinado valor de sucção (0 kPa), na base do permeâmetro, e, superior, de imposição de velocidade de descarga constante, no topo da amostra.

O permeâmetro possui três componentes principais: sistema de controle de descarga; cilindro de parede rígida onde se dispõe o corpo de prova de solo e reservatório inferior de coleta de água, conforme Figura 2.19.

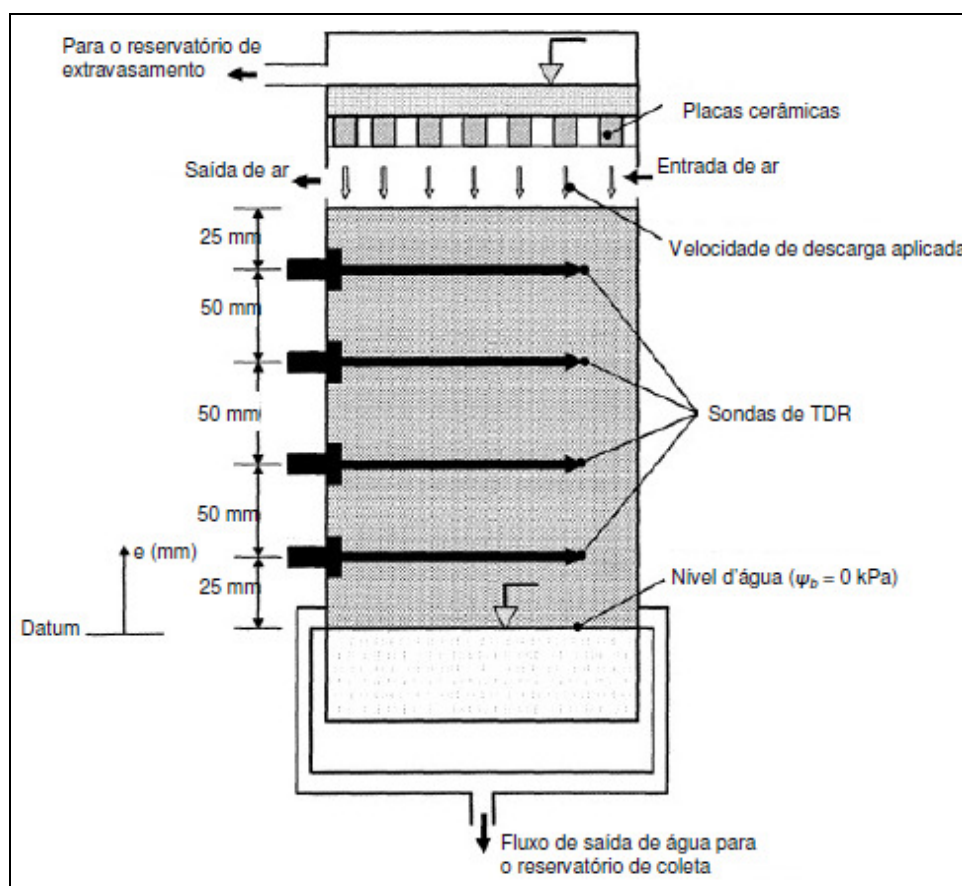


FIGURA 2.19 – ESQUEMA GERAL DO DISPOSITIVO USADO PARA OS ENSAIOS EM CENTRÍFUGA POR DELL'AVANZI (2004).

Fonte: Dell'Avanzi (2006).

Dell'Avanzi (2006) utilizou este equipamento para determinação experimental da condutividade hidráulica não saturada de uma areia e comparação dos resultados experimentais com resultados obtidos pelo modelo de Mualem-van Genuchten. A condutividade hidráulica não saturada foi

determinada experimentalmente por 10 ensaios centrífugos, o resultado obtido é apresentado na Figura 2.20.

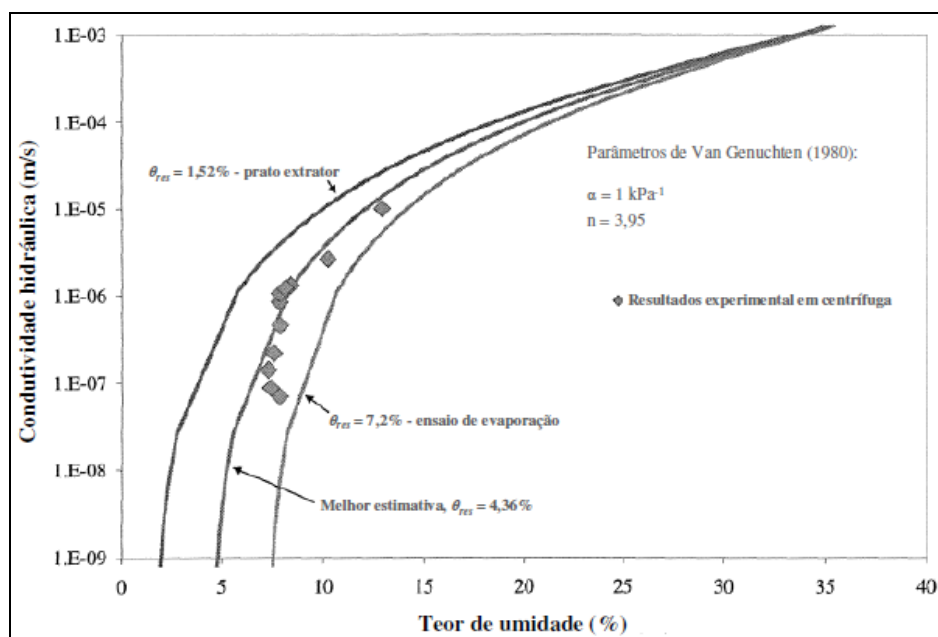


FIGURA 2.20 – RESULTADOS OBTIDOS POR DELL'AVANZI (2006).

Fonte: Dell'Avanzi (2006).

Zornberg e McCartney (2010) apresentaram um novo permeâmetro centrífugo, similar ao de Dell'Avanzi (2004), mas que permite a obtenção concomitante da CRUS e da função de condutividade hidráulica sem a necessidade de adoção de simplificações da lei de Darcy. A Figura 2.21 mostra o equipamento em questão em repouso (lado esquerdo) e durante a centrifugação (lado direito).

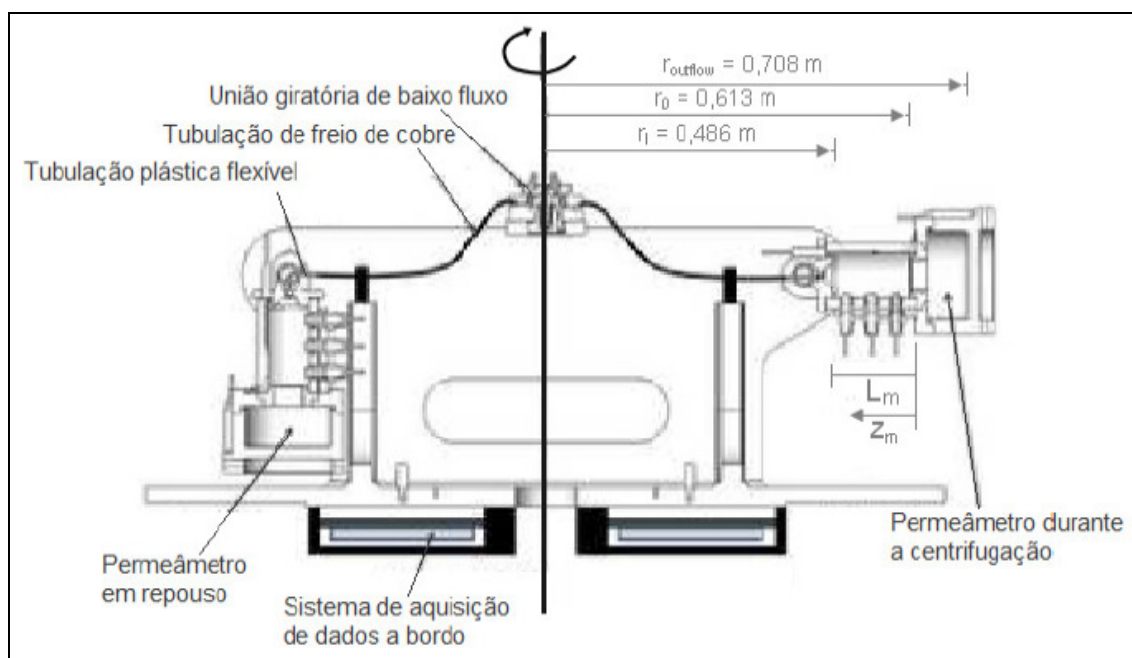


FIGURA 2.21 – EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO POR ZORNBERG E MCCARTNEY (2010).

Fonte: Zornberg e McCartney (2010).

Neste equipamento, três tensiômetros dispostos ao longo da amostra de solo são utilizados para determinar a distribuição de sucção durante cada ensaio. Um único TDR é acoplado longitudinalmente no interior do permeômetro próximo à parede de acrílico. Este arranjo permite a determinação da umidade média do solo que estiver em contato direto com o dispositivo.

No entanto, como já foi explicado anteriormente com dados de Dell'Avanzi *et al.* (2006), a sucção e, conseqüentemente, a umidade na porção superior da amostra são relativamente constantes durante o fluxo permanente para altas velocidades angulares. Desta maneira, a umidade média determinada pelo TDR pode ser utilizada para determinação das características hidráulicas do solo em estado permanente. Outro aspecto importante deste método é que não há imposição de sucção à amostra em qualquer ponto, como ocorre nos demais métodos centrífugos (Zornberg e McCartney, 2010).

Para testar o equipamento proposto, McCartney e Zornberg (2010) realizaram a determinação da curva de condutividade hidráulica para uma argila compactada de baixa plasticidade. Os resultados e conclusões mais importantes, e relevantes para o estudo em questão, foram:

- Para a argila ensaiada, sob taxas de fluxo de entrada de 20 a 0,1 ml/hr e velocidades angulares de 100 a 400 rpm, os valores de sucção variaram de 5 a 70 k Pa, valores de umidade volumétrica variaram de 23% a 33% e valores de condutividade hidráulica ficaram na faixa de 2×10^{-7} m/s a 8×10^{-11} m/s.
- Foram testadas três diferentes abordagens de ensaio: variação da taxa de fluxo, variação do nível de gravidade e variação de ambos os parâmetros. A abordagem de ensaio que envolvia aumento da velocidade centrífuga e redução da taxa de entrada de água em estágios forneceu o maior número de dados no menor tempo de duração do ensaio.
- Mudanças na velocidade de descarga de uma ordem de magnitude resultaram em mudanças na mesma ordem de magnitude na condutividade hidráulica da porção superior da amostra.
- Os resultados dos ensaios centrífugos foram obtidos com significativamente menos tempo do que em ensaios convencionais (gravidade normal) de infiltração. Para determinação de 20 pontos de condutividade hidráulica não saturada em centrífuga foram necessárias 200 horas, já para determinação de 2 pontos em ensaio de infiltração convencional são requeridos 1800 horas.
- Foi observada menor dispersão nos resultados experimentais da CRUS e da Função-K usando infiltração permanente em permeâmetro centrífugo do que usando dados de infiltração com fluxo transiente em gravidade normal.

Analisando as similaridades entre os permeâmetros centrífugos descritos verifica-se que ambos os métodos utilizam controle de fluxo externo visando fornecer uma taxa de infiltração constante, independentemente da velocidade angular, para a amostra de solo (abordagem similar à utilizada no método UFA). Ambos são operados em centrífugas geotécnicas, possuem

dispositivos para determinação do perfil de sucção e/ou umidade ao longo da amostra e utilizam sistemas de aquisição de dados para obtenção dos dados de fluxo de saída e medidas dos dispositivos. Estas características podem ser consideradas melhoramentos em relação aos métodos descritos anteriormente de Nimmo *et al.* (1987) e Conca e Wright (1992).

Segundo Zornberg e McCartney (2010), as centrífugas geotécnicas são projetadas para indicar a resposta mecânica de estruturas e não para investigar fenômenos de fluxo, assim um maior suporte de carga e raio são desejáveis. Devido a este fato, as centrífugas médicas utilizadas nos métodos IFC e UFA podem impor maior aceleração do que as centrífugas geotécnicas, de maior porte. Apesar disso, a capacidade (cerca de 500g) e o raio (12 cm) destas são muito menores, o que impede o uso do sistema de aquisição de dados utilizado por Dell'Avanzi (2004), Zornberg e McCartney (2010).

O permeâmetro de Zornberg e McCartney (2010) possui as seguintes vantagens em relação ao de Dell'Avanzi (2004): estabelecimento simultaneamente da CRUS e da função de condutividade hidráulica; não há necessidade da aplicação da hipótese de gradiente de sucção desprezível na porção superior da amostra e, com isso, não há necessidade de utilização da lei de Darcy simplificada. Além disso, a instrumentação acoplada ao permeâmetro de Zornberg e McCartney (2010) permite a avaliação da influência de condições de contorno de fluxo livre (*open-flow*) no perfil de sucção da amostra.

2.3.2.3.2 Métodos transientes

No caso de ensaios transientes destacam-se os métodos propostos por Singh *et al.* (2001), Singh *et al.* (2002) e, mais recentes, por Reis *et al.* (2011) e Sterck (2011).

Estes métodos utilizam centrífugas de pequena escala para induzir um estado não saturado no solo em regime transiente, possibilitando a determinação da condutividade hidráulica não saturada de forma mais rápida que através dos ensaios permanentes em centrífuga.

Singh *et al.* (2001) e Singh *et al.* (2002) efetuaram ensaios com várias amostras de solo, submetendo-as a diferentes velocidades de rotação, por

diferentes períodos de tempo. O procedimento de ensaio consistia em, ao final de cada estágio e tempo de rotação, determinar a umidade através da amostragem da coluna de solo em diferentes camadas. Os dados dos ensaios permitem a determinação da velocidade de fluxo e do gradiente hidráulico, os quais são utilizados na Lei de Darcy para estimativa da condutividade hidráulica não saturada.

O método proposto por Reis *et al.* (2011) e Sterck (2011), consiste em um aprimoramento do método anterior nos seguintes aspectos:

- o número de amostras utilizadas é reduzido pela possibilidade de utilização da mesma amostra em todos os estágios de aceleração, para todo intervalo de tempo do ensaio, sem necessidade de retiradas e amostragens em tempos intermediários;
- diferentes tipos de solo podem ser testados simultaneamente;
- permite atingir maiores valores de sucção;
- estabelece um critério para estimativa do tempo para chegada ao estado de equilíbrio a cada estágio de aceleração, estado em que a condutividade hidráulica deve ser determinada.

Este método de determinação da Função-K, proposto por Reis *et al.* (2011) e Sterck (2011), foi utilizado no presente estudo para estimativa da CRUS de dois solos siltosos. Os detalhes da metodologia e aparato experimental empregados são descritos no Capítulo 3, item 3.2.

2.3.3 Condutividade hidráulica saturada

Devido à dependência da condutividade hidráulica não saturada em relação à umidade, torna-se muito mais complicado medir esta em comparação à condutividade hidráulica saturada. A última pode ser determinada em laboratório, por meio de permeâmetros de carga constante ou variável, medidas indiretas obtidas através de ensaios de adensamento ou em campo (Lambe *et al.*, 1969; Pinto, 2002; Das, 2007).

A determinação da condutividade hidráulica saturada em permeâmetros de carga constante é realizada da seguinte maneira: uma coluna de solo no interior do permeâmetro é saturada com água e mede-se a quantidade de água, mantida a nível constante, que atravessa a coluna durante um

determinado tempo em regime permanente. O coeficiente de permeabilidade é calculado diretamente pela Lei de Darcy.

$$K = \frac{V}{At \frac{\Delta h}{L}} \quad (2.49)$$

Onde V é o volume de saída, A é a área da seção de saída, Δh é a variação da carga hidráulica, L é a altura da coluna de solo e t é o intervalo de tempo considerado. Este método se aplica a solos com alta condutividade hidráulica, como areias.

O outro método citado, permeâmetro de carga variável, é recomendado para solos de baixa condutividade hidráulica saturada ($K < 1,5 \times 10^{-6}$ m/s). Neste método, mede-se o tempo t com que o líquido percorre a altura h_i até a h_f em uma bureta de área a ligada à coluna de solo.

$$K = 2,303 \frac{aL}{At} \log \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad (2.50)$$

Os ensaios de condutividade hidráulica saturada são amplamente utilizados na prática, sendo padronizados pela ABNT. Para caracterização de amostra de solos argilosos, usados, por exemplo, em cobertura de aterros sanitários, o ensaio mais comum é o de carga variável definido pela norma ABNT NBR 14545/2000. Já para solos arenosos utiliza-se a norma ABNT NBR 13292/1995 (ensaio de permeabilidade a carga constante).

O valor da condutividade hidráulica saturada pode também ser estimado por meio de parâmetros do ensaio adensamento (ensaio edométrico), ou a partir da fase de consolidação da amostra em ensaio de cisalhamento direto, através da seguinte relação:

$$K_{sat} = \frac{c_v a_v \gamma_w}{1 + e} \quad (2.51)$$

Onde c_v é o coeficiente de adensamento, a_v é o coeficiente de compressibilidade, e e o índice de vazios do estágio de adensamento.

O coeficiente de adensamento (c_v) é dado pela seguinte expressão:

$$c_v = \frac{0,848(0,5H_{50})^2}{t_{90}} \quad (2.52)$$

Onde H_{50} é a altura do corpo de prova correspondente a 50% do adensamento primário ($H_{50} = H_0 - \frac{5}{9}(H_0 - H_{90})$) e t_{90} é o tempo necessário para que ocorra 90% do adensamento.

A partir da relação gráfica entre altura da amostra e raiz quadrada do tempo, seguindo o método de Taylor (Figura 2.22), obtém-se H_0 , H_{90} e t_{90} .

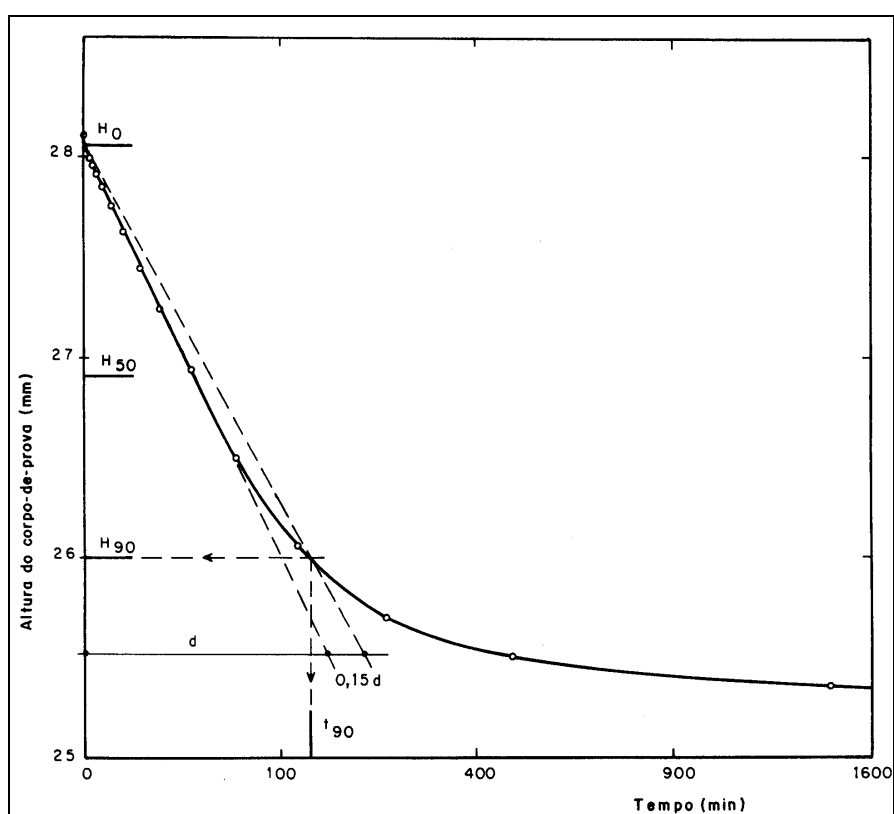


FIGURA 2.22 – DETERMINAÇÃO DE H_0 E t_{90} ATRAVÉS DO MÉTODO GRÁFICO DE TAYLOR.

Fonte: ABNT NBR 12007/1997

O coeficiente de compressibilidade (a_v) é definido pela relação linear entre a variação do índice de vazios e a variação da tensão:

$$a_v = -\frac{\partial e}{\partial \sigma} \quad (2.53)$$

3 COMPONENTE EXPERIMENTAL

Para atender ao objetivo deste estudo, de comparação entre métodos experimentais para determinação da função de condutividade hidráulica de solos, foram selecionados três solos com comportamentos distintos:

- Solo grosso: representado pela areia de Paranaguá – PR, previamente estudado por Camilotti *et al.* (2006), Furlan (2008) e Guizelini (2011).
- Solo fino 1 ou solo siltoso 1: solo siltoso caracterizado por uma coloração vermelha, característico da formação Tatuí, proveniente do município de Itapetininga – SP, também foi previamente estudado por Guizelini (2011).
- Solo fino 2 ou solo siltoso 2: caulim proveniente do município de Tijucas do Sul – PR.

Os métodos experimentais para determinação da Função-K utilizados foram dois, a saber:

- método em centrífuga de pequena escala (equipamento disponível na UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro), e
- método em permeâmetro com aplicação de diferentes condições de pressurização para acelerar o fluxo através do solo.

Para os solos finos foram efetuados ensaio em centrífuga de pequena escala, para determinação da curva de retenção de umidade do solo e Função-K e ensaio no permeâmetro com pressurização para Função-K apenas.

Para a areia, por ser um solo grosso, os ensaios em centrífuga não são indicados em virtude da drenagem muito rápida dos poros que a força centrípeta proporciona. Para esse solo foi efetuado apenas o ensaio com aplicação de pressão de ar em permeâmetro.

Além dos ensaios para análise da permeabilidade não saturada, foram efetuados ensaios para caracterização dos solos, para determinação da curva de retenção de umidade e para determinação da condutividade hidráulica saturada.

Os solos arenoso e siltoso 1 já haviam sido caracterizados em trabalhos anteriores (Camilotti *et al.*, 2006; Furlan, 2008; Guizelini, 2011), dos quais

alguns dados de granulometria, densidade real dos grãos, compacidade e consistência foram utilizados para o presente estudo. Para o solo siltoso 2 foram realizados ensaios para determinação da granulometria, densidade real dos grãos (G) e limites de Attenberg.

As curvas de retenção de umidade dos solos foram obtidas por meio de ensaio de coluna drenante, para a areia, e ensaio com papel filtro e centrífuga para os solos finos.

Para avaliação da condutividade hidráulica saturada dos solos foram utilizados dados de estudos pretéritos com os mesmos materiais e realizados ensaios de carga variável, com conexão de uma bureta a uma célula de adensamento, para os solos finos.

Os detalhes metodológicos de cada ensaio realizado são descritos separadamente para cada solo no item a seguir (seção 3.1). Nos demais itens deste capítulo, descreve-se os materiais necessários e a metodologia de ensaio para determinação da CRUS e Função-K em centrífuga (seção 3.2) e para a determinação da Função-K com aplicação de pressão em permeâmetro (seção 3.3).

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS

A seleção de amostras de solos para realização dos ensaios considerou a especificidades dos métodos experimentais que serão analisados, principalmente quando do uso da centrifugação. A realização de ensaios em centrífuga só é recomendada na avaliação de amostras de solo incompressíveis, nas quais a estrutura dos poros não é afetada pelo estado de tensão (Masrouri *et al.*, 2008). Esta condição deve ser respeitada, pois a centrifugação da amostra implica em um aumento da tensão normal na mesma, o que pode levar a variações de volume não consideradas pelo método.

Além disso, a seleção dos solos para análise de permeabilidade considerou a possibilidade de utilização de materiais cujas características de distribuição granulométrica, compacidade, consistência, compactação, curva de retenção de umidade e condutividade hidráulica saturada fossem previamente conhecidas. O solo grosso foi previamente estudado por Camilotti *et al.* (2006), Furlan (2008) e Guizelini (2011) e o solo siltoso 1 por Guizelini (2011).

3.1.1 Areia

O solo grosso utilizado corresponde a uma areia quartzosa de Paranaguá - PR, previamente estudada por Camilotti *et al.* (2006), Furlan (2008) e Guizelini (2011).

Camilotti *et al.* (2006) e Furlan (2008) apresentaram a caracterização desse solo com relação à granulometria e características de compacidade e hidráulicas. A caracterização do material foi conduzida seguindo os procedimentos das normas norte-americanas ASTM D 422-63 (granulometria), D 854-92 (massa específica real dos grãos pelo método do picnômetro), D 4253-93 (índice de vazios máximo utilizando mesa vibratória) e D 4254-91 (índice de vazios mínimo e cálculo da densidade relativa).

3.1.1.1 Granulometria e classificação

Conforme ABNT NBR 6502/95, areia consiste em um solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rocha com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. As areias de acordo com o diâmetro classificam-se em areia fina (0,06 mm a 0,2 mm), areia média (0,2 mm a 0,6 mm) e areia grossa (0,6 mm a 2,0 mm).

A curva granulométrica para esse solo é apresentada na Figura 3.1. Pela análise da curva granulométrica verifica-se que: mais de 90% da amostra possui partículas menores do que 0,6 mm; mais de 50% das partículas tem diâmetro entre 0,6 mm e 0,2 mm, e cerca de 45% ficam entre 0,2 mm e 0,06 mm, sendo, portanto, conforme ABNT NBR 6502/95, uma areia média a fina.

Conforme a classificação pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), baseado na análise da curva granulométrica, a areia de Paranaguá classifica-se como areia mal graduada (SP). Apresenta 97,5% das partículas retidas na peneira # 200 (sendo, portanto, um solo grosso), 100% da fração grossa ($> 0,075$ mm) passando na peneira # 4 (4,8 mm), coeficiente de uniformidade de 1,5 e coeficiente de compacidade (C_c) de 0,98.

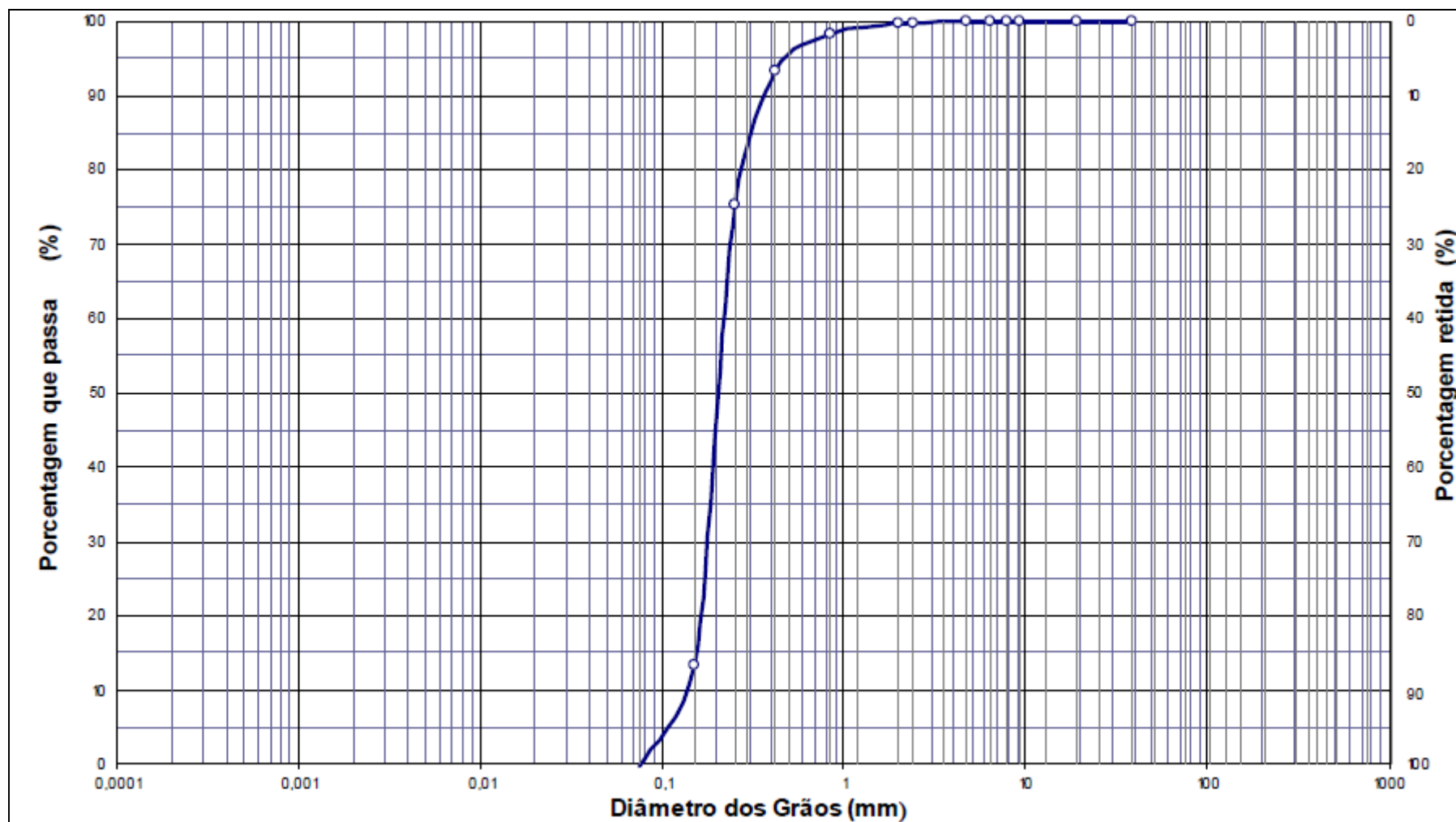


FIGURA 3.1 – CURVA GRANULOMÉTRICA PARA SOLO GROSSO.

Fonte: Furlan (2008).

3.1.1.2 Compacidade

Para solos não coesivos o índice de vazios máximo e mínimo constitui-se no parâmetro básico para avaliação do estado de compacidade do solo. O índice de vazios corresponde à razão entre o volume de vazios do solo e o volume total do mesmo. Em um estado mais fofo o solo apresenta um índice de vazios máximo, o oposto ocorre quando o solo se encontra mais compacto, sendo neste caso obtido o índice de vazios mínimo.

Os procedimentos de ensaio em laboratório para obtenção do índice de vazios máximo e mínimo para solos granulares são descritos, respectivamente, nas normas da ABNT NBR 12004/1990 e NBR 12051/1991 e normas norte-americanas ASTM D 4253-93 e D 4254-91. Em ambos os casos o procedimento consiste basicamente em determinar o peso e volume do solo seco e utilizar estes valores para computo do índice de vazios através da seguinte expressão:

$$e = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d} \right) - 1 \quad (3.1)$$

Sendo que, no caso de $e_{máx}$ deve-se obter o valor da massa específica aparente seca mínima e, no caso de $e_{mín}$, a máxima.

As características de compacidade do solo arenoso, obtidas por Camilotti *et al.* (2006), são apresentadas na Tabela 3.1, a seguir.

TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DO SOLO ARENOSO.

Índice de vazios mínimo ($e_{mín}$)	Índice de vazios máximo ($e_{máx}$)	Densidade relativa (G)
0,51	0,78	2,64

Fonte: Camilotti *et al.* (2006).

Com o intuito de verificar o valor do índice de vazios máximo da areia, realizou-se uma nova série de ensaios para este parâmetro. O procedimento de ensaio consistiu em preencher um tubo de PVC com areia na umidade residual (0,14%), com auxílio de um funil. Após preenchimento completo, o

tubo foi sacado gradualmente no interior de um cilindro de Proctor com volume conhecido (1.000 cm^3). A massa de solo dentro do cilindro foi pesada obtendo-se o peso específico seco do solo, e, através da Equação 3.1, o seu índice de vazios. Esse procedimento foi repetido por seis vezes e o maior índice de vazios medido foi de 0,90 (Tabela 3.2), sendo esse valor definido como índice de vazios máximo do solo em substituição ao valor 0,78 apresentado previamente por Camilotti *et al.* (2006).

TABELA 3.2 – RESULTADOS DO ENSAIO PARA VERIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO.

Massa (g)	Peso específico seco (kN/m^3)	Índice de vazios
1397,34	13,66	0,896
1398,2	13,67	0,895
1403,34	13,72	0,888
1394,93	13,64	0,899
1394,16	13,63	0,900
1407	13,75	0,883

3.1.1.3 Curva de retenção de umidade do solo (CRUS)

A curva de retenção de umidade do solo (CRUS) arenoso foi obtida por Furlan e Dell'Avanzi (2007) através de ensaio de coluna drenante para processos de drenagem e umedecimento (Figura 3.2).

Para os pontos experimentais obtidos durante a drenagem, Furlan (2008) avaliou a função contínua proposta por van Genuchten (1980), conforme Figura 3.3.

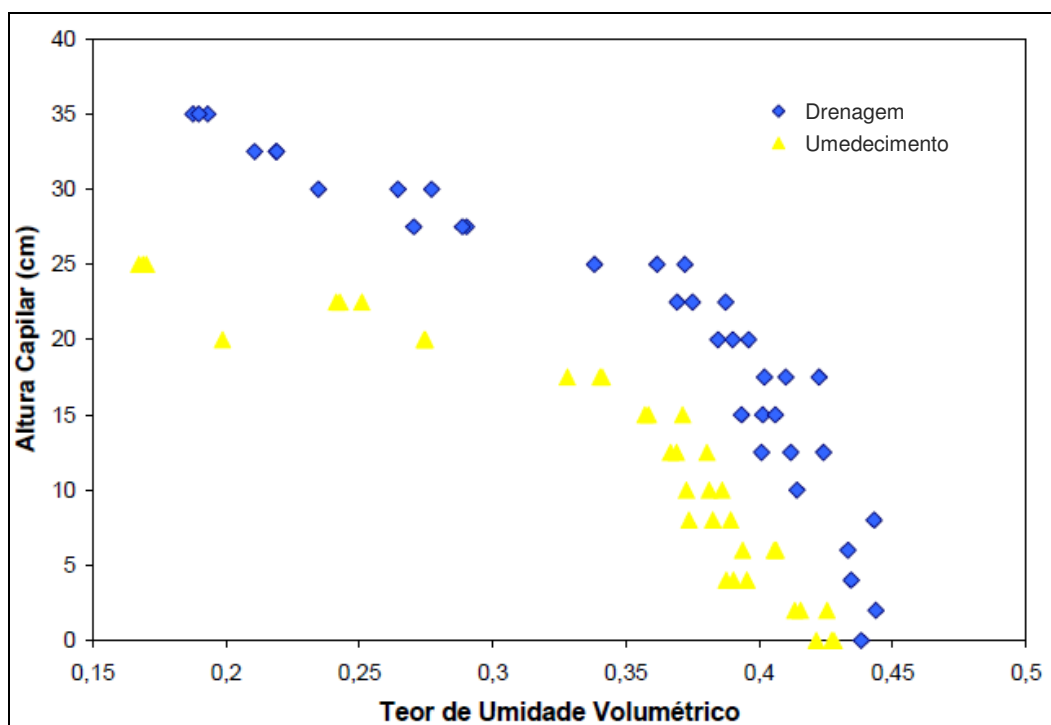


FIGURA 3.2 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DA AREIA DE PARANAGUÁ PARA PROCESSO DE DRENAGEM E UMEDECIMENTO (DENSIDADE RELATIVA DE 30%).

Fonte: Furlan e Dell'Avanzi (2007).

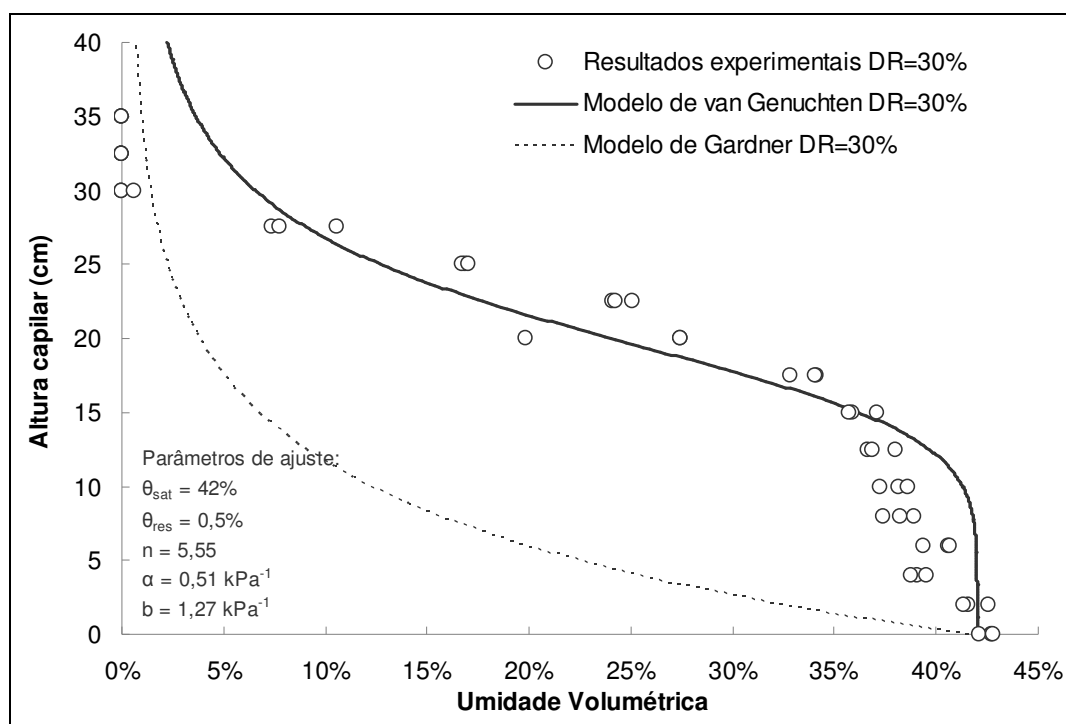


FIGURA 3.3 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO ARENOSO COM AJUSTE PELOS MODELOS DE VAN GENUCHTEN E DE GARDNER (DENSIDADE RELATIVA DE 30%).

Fonte: Adaptado de Furlan (2008).

A CRUS apresentada por Furlan e Dell'Avanzi (2007) e Furlan (2008) foi obtida para um material moldado por meio de chuva de areia com uma altura de queda fixa de 20 cm, pela qual obteve-se uma densidade relativa de 30%, e, considerando os índices de vazios máximos e mínimos supracitados, índice de vazios inicial de 0,63.

Para o presente estudo, o ensaio de coluna drenante foi realizado novamente, com alteração nas características iniciais da amostra de solo utilizada, a fim de adequar à moldagem empregada no ensaio de condutividade hidráulica não saturada com permeâmetro. A amostra para ensaio de coluna drenante foi moldada com chuva de areia com altura de queda constante de 80 centímetros levando a uma densidade relativa de 75% e, índice de vazios inicial de 0,806. O ensaio para avaliação da CRUS nestas condições foi realizado considerando primeiramente o processo de umedecimento e posteriormente o processo de drenagem, sendo para isto utilizadas duas amostras de solo moldadas em condições semelhantes.

O procedimento aplicado para ensaio de coluna drenante em processo de drenagem e de umedecimento foi descrito na revisão bibliográfica, item 2.1.4.1.

Para o processo de umedecimento, uma coluna de solo de 20 cm foi moldada nas condições supracitadas (Figura 3.4) e o nível d'água foi posicionado a 2 cm da base da coluna. O nível d'água foi constantemente monitorado a fim de verificar o posicionamento correto. Quando detectado rebaixamento do mesmo acrescentava-se água a fim de garantir a manutenção da altura de água nas colunas laterais. O processo de ascensão capilar foi monitorado a fim de verificar o momento de parada do ensaio (Figura 3.5). Como critério de parada adotou-se a constância da altura capilar por um período mínimo de 24 horas.

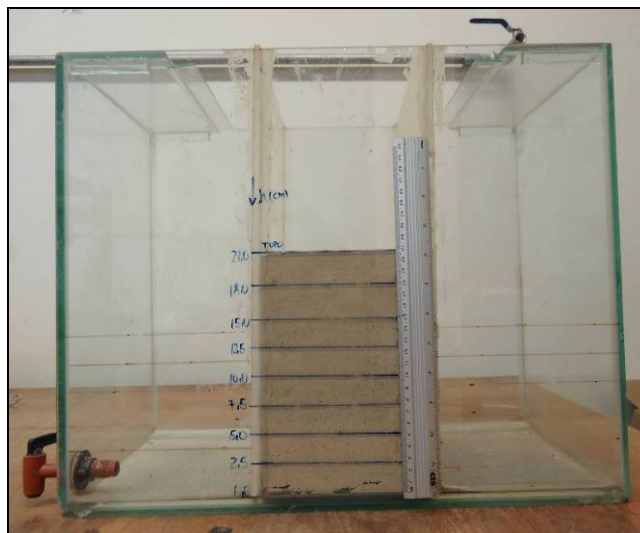


FIGURA 3.4 – AMOSTRA DE SOLO INICIALMENTE SECA PARA ENSAIO EM COLUNA DRENANTE – PROCESSO DE UMEDECIMENTO.

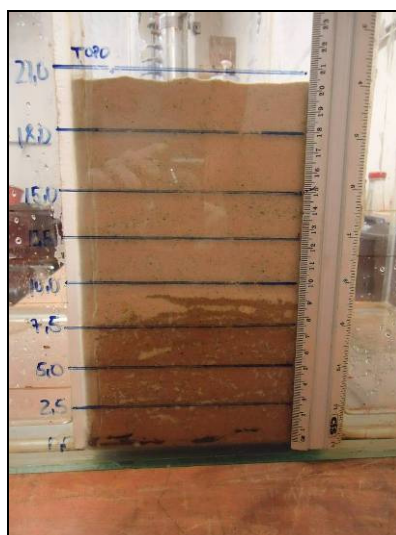


FIGURA 3.5 – MONITORAMENTO DA ASCENSÃO CAPILAR EM ENSAIO EM COLUNA DRENANTE – PROCESSO DE UMEDECIMENTO.

Para o processo de drenagem, inicialmente a amostra foi saturada e, em seguida, permitiu-se a drenagem livre da água. Para a saturação da amostra, água destilada foi adicionada às colunas laterais do aparato de ensaio gradualmente, na medida em que ocorria a ascensão capilar. O posicionamento da franja capilar foi monitorado neste processo para garantir que o gradiente hidráulico aplicado estivesse sempre abaixo da elevação da franja capilar. Após identificação visual da chegada ao estado saturado,

possibilitou-se a drenagem livre, por meio da abertura da torneira localizada a 2 cm da base da coluna, até o estabelecimento do nível da água nessa elevação.

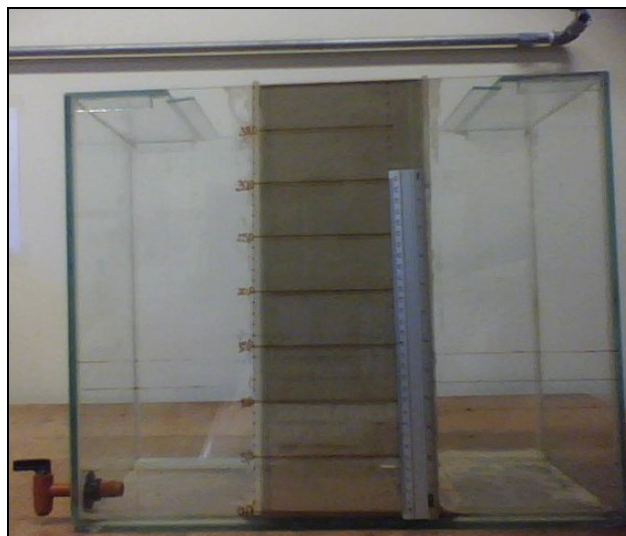


FIGURA 3.6 – AMOSTRA DE SOLO INICIALMENTE SECA PARA ENSAIO EM COLUNA DRENANTE – PROCESSO DE DRENAGEM.



FIGURA 3.7 – SATURAÇÃO GRADUAL DA AMOSTRA PARA ENSAIO EM COLUNA DRENANTE – PROCESSO DE DRENAGEM.



FIGURA 3.8 – INÍCIO DA DRENAGEM LIVRE EM ENSAIO EM COLUNA DRENANTE.



FIGURA 3.9 – FINAL DA DRENAGEM LIVRE EM ENSAIO EM COLUNA DRENANTE.

Da mesma forma que para o ensaio com processo de umedecimento, o critério de parada utilizado foi a constância do perfil de umidade (verificado visualmente através da coloração da areia) por um período mínimo de 24 horas, após o qual procedeu-se à amostragem da coluna de solo em diferentes alturas para determinação da umidade.

O ensaio com processo de drenagem foi executado primeiramente para uma coluna de solo de 20 cm. Em virtude dos resultados obtidos, amostras com alto grau de saturação apenas, um novo ensaio foi realizado com coluna de 39 cm de altura (Figuras 3.6 a 3.9).

Em ambos os processos, a amostragem direta da coluna para determinação das umidades em diferentes alturas foi realizada apenas após o período mínimo de 24 horas, para garantia da ausência de fluxo através do sistema. Para as colunas de solo com 20 cm, foram retiradas 30 amostras de solo em 10 alturas, de 2 cm em 2 cm, sendo três amostras por altura. Para a coluna de solo com 39 cm (apenas para o processo de drenagem), foram retiradas 45 amostras de solo em 15 alturas, de 2 em 2 cm até a altura de 20 cm e de 5 em 5 cm para alturas inferiores, sendo três amostras por altura. As amostras foram pesadas e secadas em estufa por 24 horas para determinação do peso seco e umidade gravimétrica. Com base nos parâmetros da amostra do solo (peso específico seco) calculou-se a umidade volumétrica. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 3.3 e Figura 3.10. A curva de retenção de umidade do solo foi plotada considerando a relação entre umidade volumétrica e altura do solo (Figura 3.10).

TABELA 3.3 – RESULTADO DO ENSAIO DE COLUNA DRENANTE.

Altura (cm)	Processo de umedecimento		Processo de drenagem	
	Umidade gravimétrica	Umidade volumétrica	Umidade gravimétrica	Umidade volumétrica
38	-	-	10,06%	14,71%
36	-	-	10,75%	15,72%
33	-	-	15,00%	21,93%
32	-	-	20,13%	29,44%
30	-	-	21,14%	30,90%
28	-	-	23,58%	34,48%
26	-	-	22,50%	32,89%
23	-	-	25,55%	37,35%
21	-	-	24,08%	35,21%
20	0,25%	0,36%	25,53%	37,33%
18	0,17%	0,25%	26,67%	38,99%
16	0,17%	0,25%	26,25%	38,38%
15	-	-	26,46%	38,69%
14	1,14%	1,66%	26,85%	39,26%
12	21,25%	31,07%	27,06%	39,56%
10	27,00%	39,48%	26,90%	39,33%
8	27,62%	40,38%	27,80%	40,64%
6	27,73%	40,55%	26,73%	39,08%
5	-	-	27,01%	39,49%
4	28,12%	41,11%	27,93%	40,84%
2	28,03%	40,98%	28,13%	41,12%

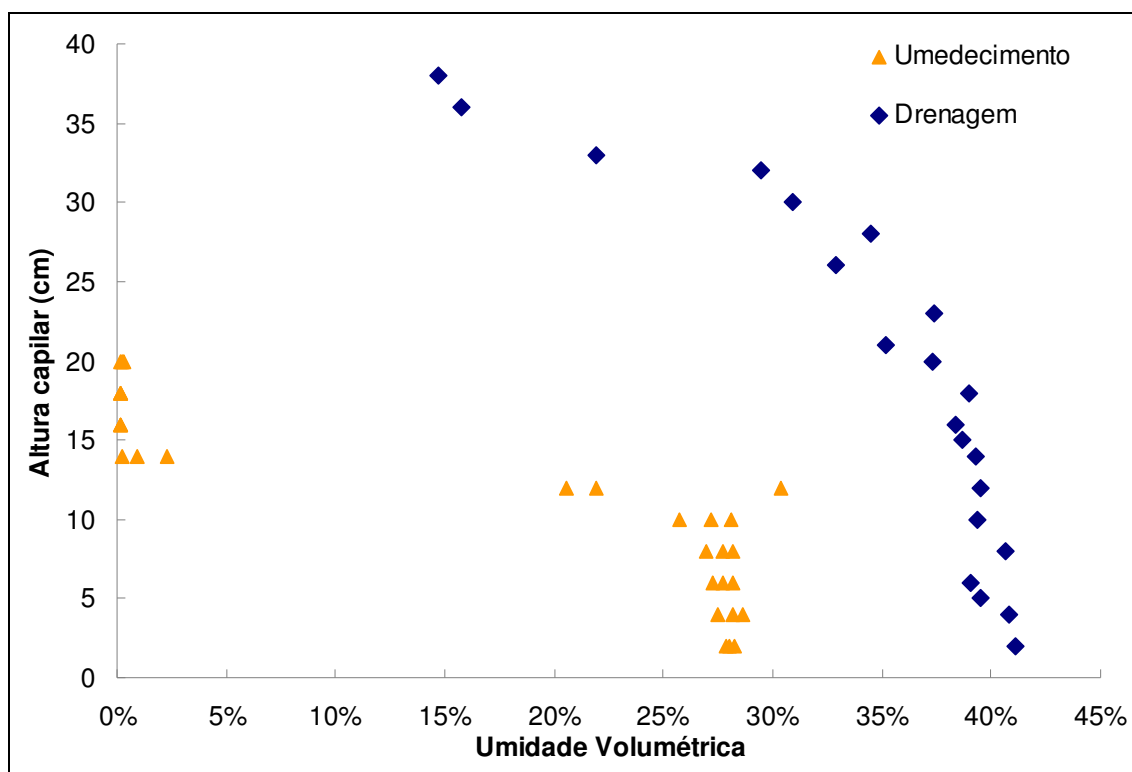


FIGURA 3.10 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DA AREIA DE PARANAGUÁ PARA PROCESSO DE DRENAGEM E UMEDECIMENTO (DENSIDADE RELATIVA DE 75%).

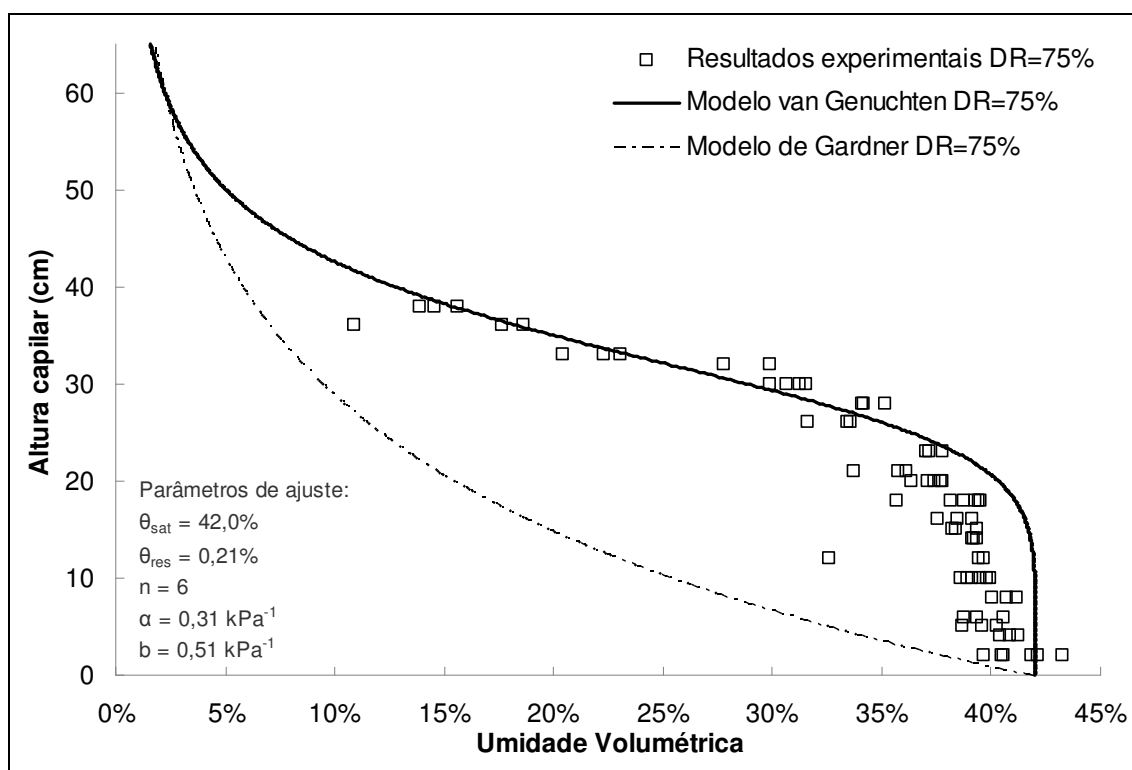


FIGURA 3.11 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO ARENOSO COM AJUSTE PELOS MODELOS DE VAN GENUCHTEN E DE GARDNER (DENSIDADE RELATIVA DE 75%).

De acordo com o gráfico da Figura 3.11, que apresenta os dados experimentais para a curva de retenção de umidade no processo de drenagem e os ajustes da função pelos modelos de van Genuchten e de Gardner (Tabela 3.4), verifica-se que o modelo de van Genuchten se ajusta melhor aos dados experimentais do que o modelo exponencial de Gardner, o qual se representa bem apenas a porção da curva com valores de umidade pequenos (menores do que 5%).

TABELA 3.4 – PARÂMETROS DE VAN GENUCHTEN E DE GARDNER PARA O SOLO ARENOSO.

Parâmetros	Densidade relativa 30%	Densidade relativa 75%
Umidade volumétrica na saturação (%)	42*	42**
Umidade volumétrica residual (%)	0,5*	0,21**
Parâmetro n de ajuste de van Genuchten	5,55*	6
Parâmetro α de ajuste de van Genuchten (kPa^{-1})	0,51*	0,31
Parâmetro b de ajuste de Gardner (kPa^{-1})	1,27	0,51

* Fonte: Furlan (2008).

** Parâmetros obtidos com base na umidade máxima medida no ensaio de coluna drenante e na umidade mínima medida por secagem ao ar.

O parâmetro b , do modelo de Gardner, é uma constante relativa ao inverso do valor de entrada de ar no solo (ou seja, a sucção que propicia a drenagem do maior poro do solo). Considerando os resultados experimentais obtidos para densidade relativa de 75%, o valor de entrada de ar para a areia de Paranaguá fica em torno de 20 cm, o que equivale a uma sucção de 1,96 kPa. Dessa forma, obteve-se o valor de $0,51 \text{ kPa}^{-1}$ para o parâmetro b . Para a areia moldada com densidade relativa de 30% (Furlan, 2008), o valor de entrada de ar é de 8 cm, sendo o parâmetro b o inverso dessa altura capilar convertida em kPa, igual a $1,27 \text{ kPa}^{-1}$.

Com relação às diferenças de densidade relativa das amostras consideradas (Figura 3.12), verifica-se que para densidades relativas maiores a umidade volumétrica é maior para uma mesma altura capilar. Esse comportamento decorre do fato de que quanto maior a densidade relativa menor o tamanho dos poros no interior do solo e, conseqüentemente, maior a

capilaridade, ou seja, a água consegue por meio das forças capilares alcançar alturas maiores dentro da coluna de solo.

Analisando o comportamento da CRUS para diferentes densidades relativas da areia, verifica-se que o valor de entrada de ar é diretamente proporcional à densidade relativa. Para a areia com densidade relativa de 30%, o valor de entrada de ar é de 8 cm. Aumentando a densidade relativa em 2,5 vezes, para 75%, o valor de entrada de ar sofre o mesmo acréscimo de 2,5, passando a ser 20 cm. Com base nessa verificação, seria possível estabelecer o valor de entrada de ar para qualquer densidade relativa da areia, bastando obter a CRUS para uma delas.

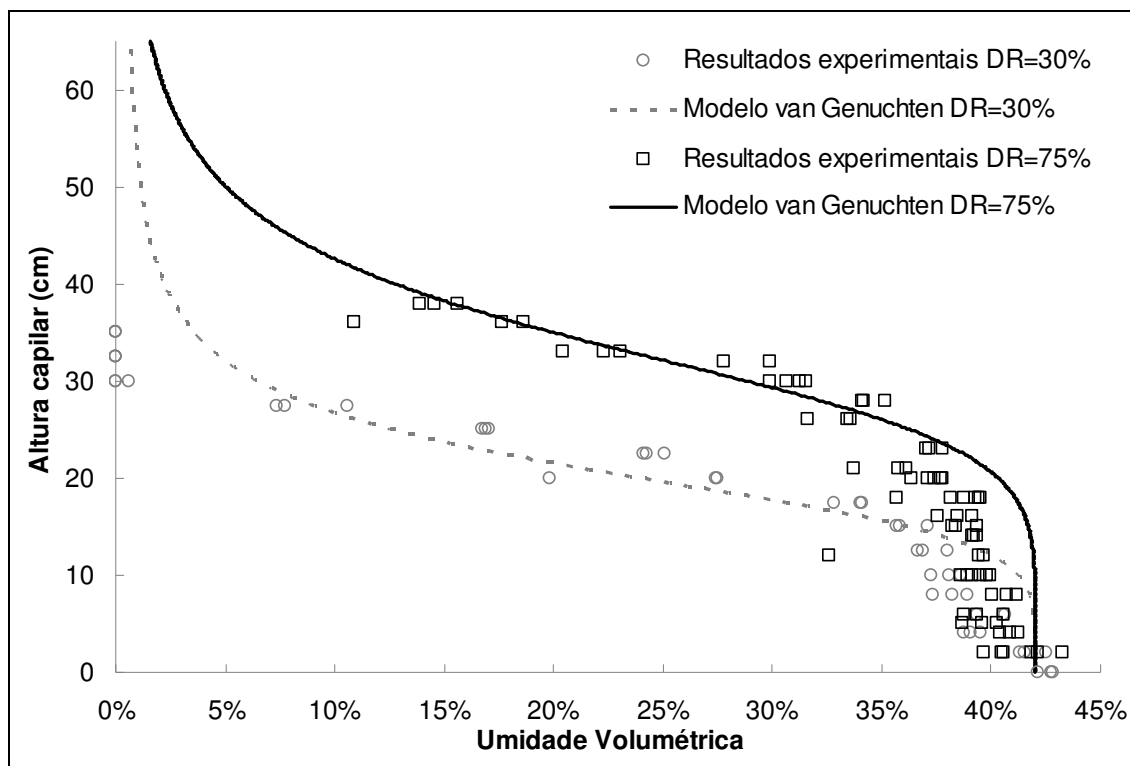


FIGURA 3.12 – CURVAS DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO ARENOSO COM AJUSTE PELO MODELO DE VAN GENUCHTEN PARA DIFERENTES DENSIDADES RELATIVAS.

3.1.1.4 Umidade residual

A fim de obter parâmetros mais acurados para a curva de retenção de umidade através do modelo de van Genuchten efetuou-se a determinação da umidade residual do solo por processo de secagem ao ar. Primeiramente foram moldadas três amostras por meio de chuva de areia com altura de queda de 80

cm, ou seja, densidade relativa de 75%. As amostras foram secas ao ar por cerca de três dias durante os quais a variação de massa das amostras foi monitorada até a verificação da estabilização, momento em que as amostras foram levadas à estufa por 24 horas para determinação da massa seca e determinação da umidade gravimétrica residual. Através desse procedimento obteve-se uma umidade gravimétrica residual média de 0,14%, a qual foi convertida na umidade volumétrica residual média de 0,21%, considerando o peso específico seco do solo determinado durante o processo de moldagem das amostras.

3.1.1.5 Condutividade hidráulica saturada

A condutividade hidráulica saturada do solo arenoso foi estimada por Furlan (2008) através de ensaios de carga constante efetuados em prensa para ensaio triaxial. Os ensaios foram realizados com a aplicação de diferentes tensões confinantes em três etapas. Os parâmetros da amostra e resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.5.

TABELA 3.5 – RESULTADOS DO ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA PARA A AREIA.

Parâmetros	Valor		
Índice de vazios	0,61		
Tensão confinante (kPa)	350		
Poropressão (kPa)	340		
Gradiente hidráulico	8		
Tensão efetiva (kPa)	10		
Umidade (%)	0,17		
Porosidade (%)	37,8%		
Volume da amostra (cm ³)	97		
Condutividade hidráulica saturada (cm/s)	6,60E-04 (etapa 1)	6,60E-04 (etapa 2)	6,00E-04 (etapa 3)
Condutividade hidráulica saturada média (cm/s)	6,40E-04		

Fonte: Furlan (2008).

A determinação da CRUS e da condutividade hidráulica saturada são fundamentais para a obtenção da função de condutividade hidráulica pelos métodos indiretos de Mualem-van Genuchten e de Gardner. A Figura 3.13

apresenta a curva de condutividade hidráulica não saturada para o solo arenoso estimada através desses modelos.

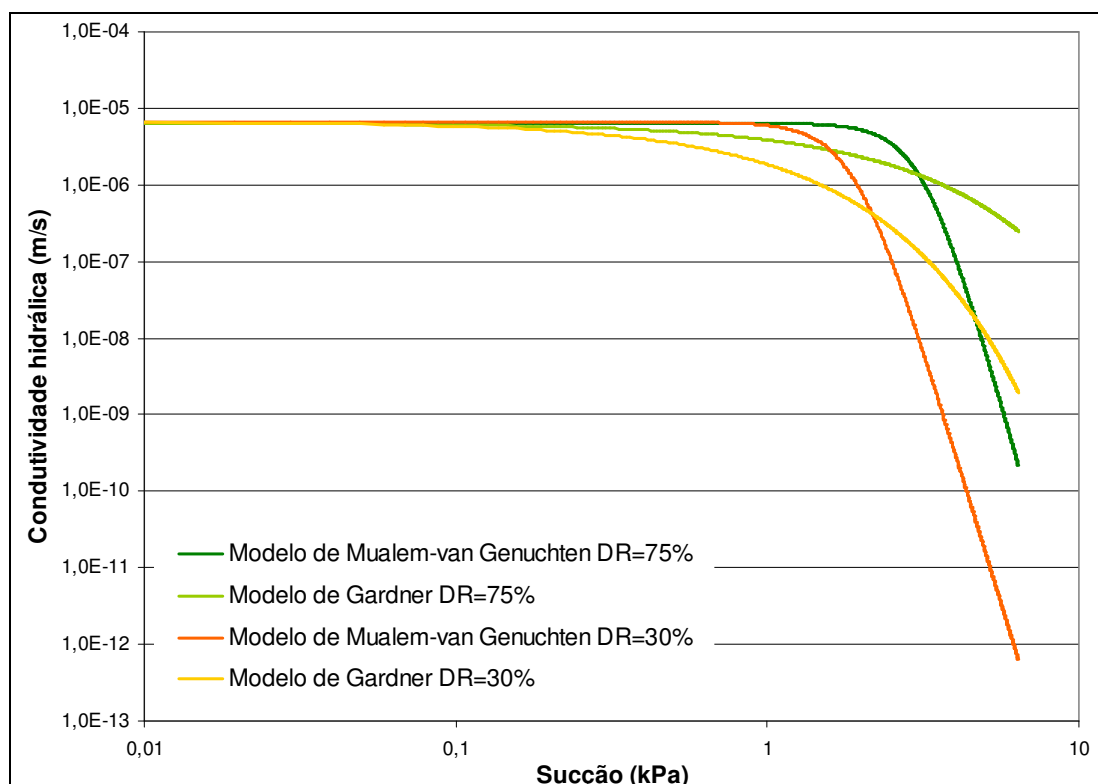


FIGURA 3.13 – FUNÇÕES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADAS PARA O SOLO ARENOSO SEGUNDO MODELOS DE MUALEM-VAN GENUCHTEN E DE GARDNER.

3.1.2 Silte 1

Um dos solos finos que será utilizado nos ensaios de permeabilidade não saturada, designado solo siltoso 1 ou simplesmente silte 1, consiste em um material proveniente do município de Itapetininga – SP, característico da formação Tatuí, de coloração vermelha, sendo o mesmo solo fino utilizado por Guizelini (2011) para avaliação do comportamento hidromecânico de solos não saturados.

3.1.2.1 Granulometria, consistência e classificação

Guizelini (2011) caracterizou e classificou esse solo siltoso por meio de ensaios de determinação dos limites de Atterberg, densidade real dos grãos e análise granulométrica. Os procedimentos adotados seguiram as normas da

TABELA 3.7 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO PARA O SOLO FINO

1.

G	LL (%)	LP (%)	IP (%)	I_a
2,82	56	44	12	0,41

Fonte: Guizelini (2011).

Com base nessas características, o solo classifica-se como MH – Silte inorgânico de alta plasticidade pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), e como argila do grupo A-7-5 pelo sistema proposto pela “American Association of State Highway and Transportation Officials” (AASHTO).

3.1.2.2 Compactação

O ensaio de compactação para o solo siltoso foi executado por Guizelini (2011) de acordo com a NBR 7182/1986. As umidades volumétricas variaram entre 20% e 40%. Para cada valor de umidade foi obtido o peso específico natural correspondente. O cilindro Proctor normal utilizado tinha massa de 2.330 g e volume de 990 cm³.

A Figura 3.15 apresenta a curva de compactação obtida para o solo siltoso. Para esse solo a umidade ótima fica em torno de 31%, o que corresponde ao peso específico seco máximo de 14,32 kN/m³.

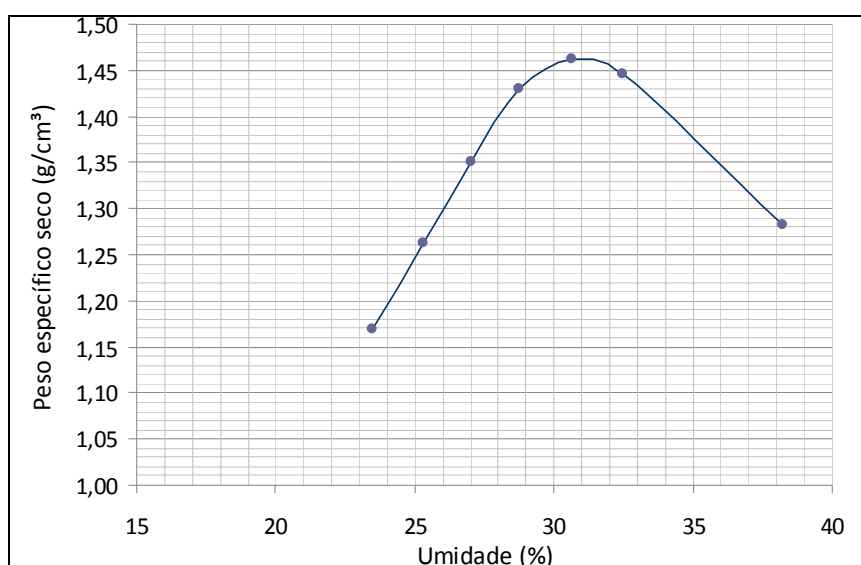


FIGURA 3.15 – CURVA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO SILTOSO 1.

Fonte: Guizelini (2011).

3.1.2.3 Curva de retenção de umidade do solo (CRUS)

A determinação da curva de retenção de umidade do solo (CRUS) foi realizada por Guizelini (2011) utilizando o método do papel filtro, normalizado pela ASTM D 5298/94. Os detalhes do procedimento executado são descritos por Guizelini (2011).

A curva de retenção é representada por pontos de secagem, para umidades volumétricas menores que 30%, e pontos de umedecimento para umidades volumétricas maiores que 30%. A Tabela 3.8 indica as características das amostras utilizadas. A Figura 3.16 mostra a curva de retenção de umidade em relação à umidade volumétrica para as sucções mátrica e total.

Segundo Guizelini (2011), a umidade volumétrica de saturação foi definida através do cálculo da porosidade média das amostras utilizadas, resultando no valor de 0,5. Mesmo com o umedecimento das amostras, o maior grau de saturação obtido foi de 0,85, de modo que o valor de sucção para a saturação foi considerado nulo.

TABELA 3.8 – DADOS DO ENSAIO DE PAPEL FILTRO PARA SOLO SILTOSO 1.

Amostra	Peso específico seco (kN/m³)	Índice de vazios	Processo	Umidade gravimétrica final (%)	Umidade volumétrica final (%)	Grau de saturação (%)
21	14,42	0,92	Secagem	2,6	3,8	8
24	13,73	1,01	Secagem	9,5	13,3	27
20	13,64	1,03	Secagem	12,3	17,1	34
9	13,93	0,98	Secagem	18,3	26	52
19	13,15	1,11	Secagem	22,2	29,7	57
22	14,52	0,91	Umedecimento	27,2	39,6	84
5	13,93	0,99	Umedecimento	27,9	39,5	79
13	13,64	1,03	Umedecimento	28,6	39,6	78
15	14,52	0,91	Umedecimento	28,7	41,1	84
10	13,44	1,05	Umedecimento	31,8	43,6	85
Média	13,89	0,99	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Guizelini (2011).

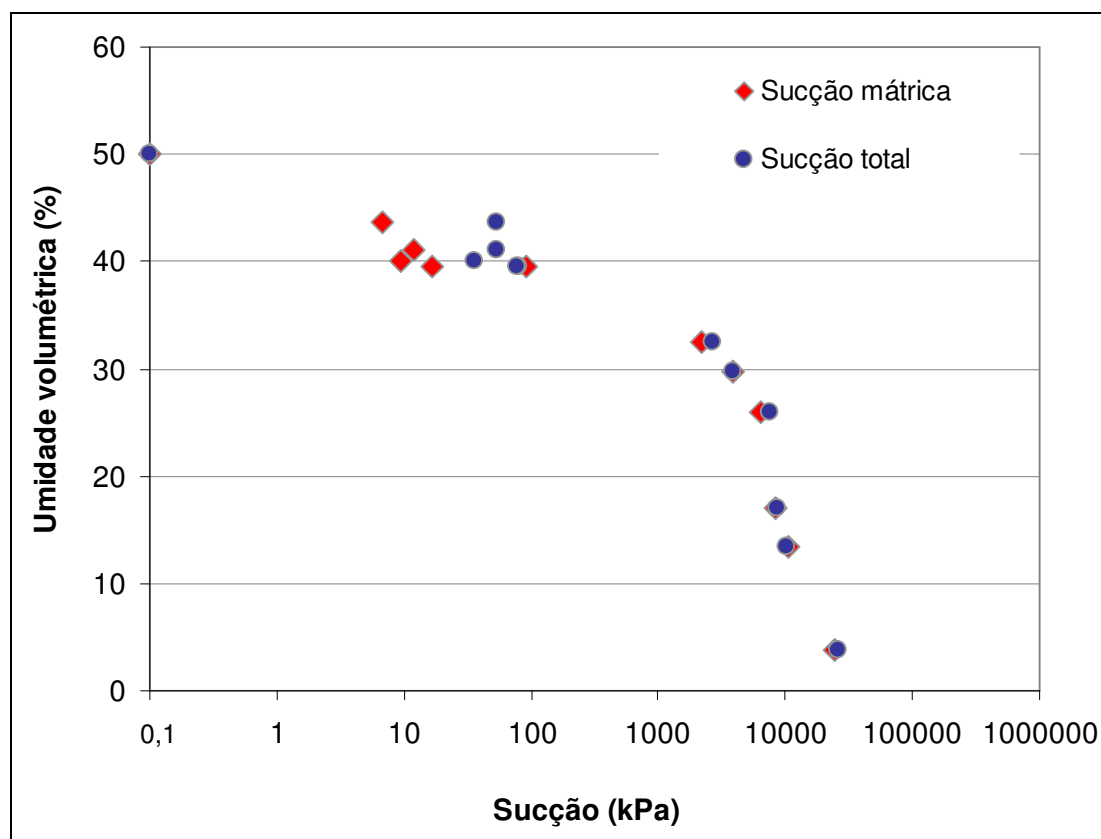


FIGURA 3.16 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO SILTOSO 1 EM FUNÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA.

Fonte: Adaptado de Guizelini (2011).

Para estabelecer uma relação contínua da CRUS, Guizelini (2011) realizou o ajuste numérico do modelo de van Genuchten (1980) aos dados experimentais. As curvas são apresentadas na Figura 3.17, assim como os seus respectivos ajustes numéricos. Como o modelo utilizado não se adequou ao comportamento experimental verificado por Guizelini (2011), foram feitos dois ajustes, um para valores de sucção inferiores a 100 kPa e outro para valores superiores a 100 kPa. Os parâmetros de ajuste obtidos por Guizelini (2011) encontram-se na Tabela 3.9.

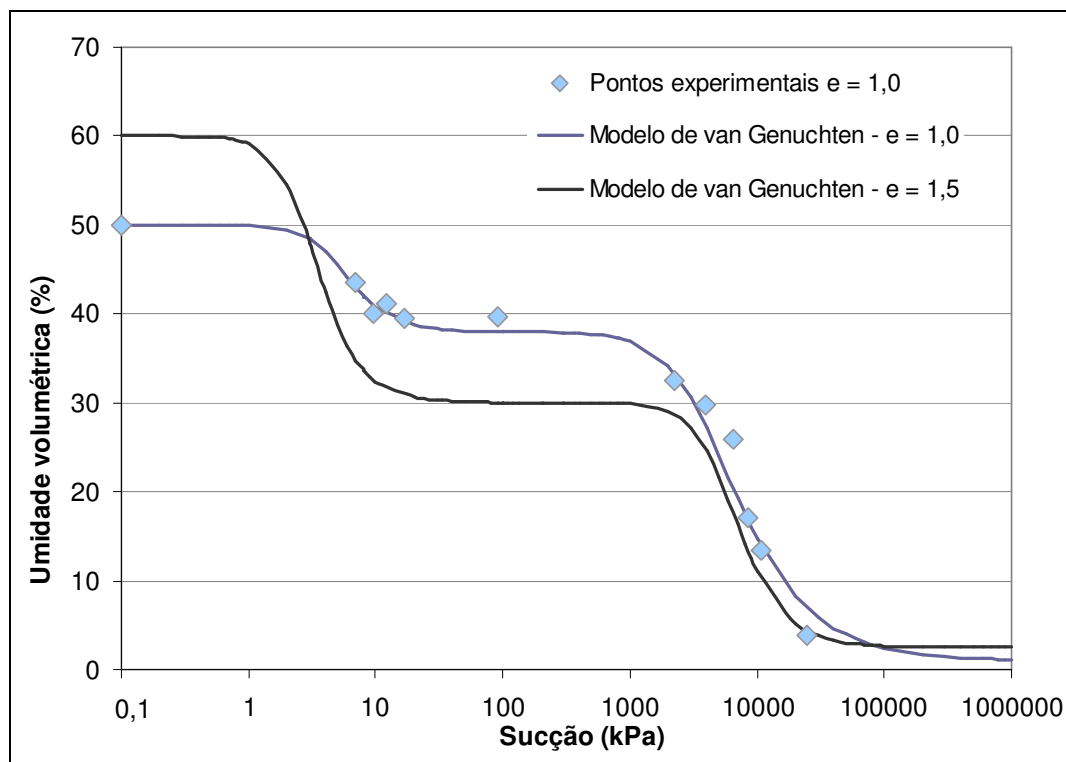


FIGURA 3.17 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE AJUSTADA PELO MODELO DE VAN GENUCHTEN PARA O SOLO SILTOSO 1.

Fonte: Adaptado de Guizelini (2011).

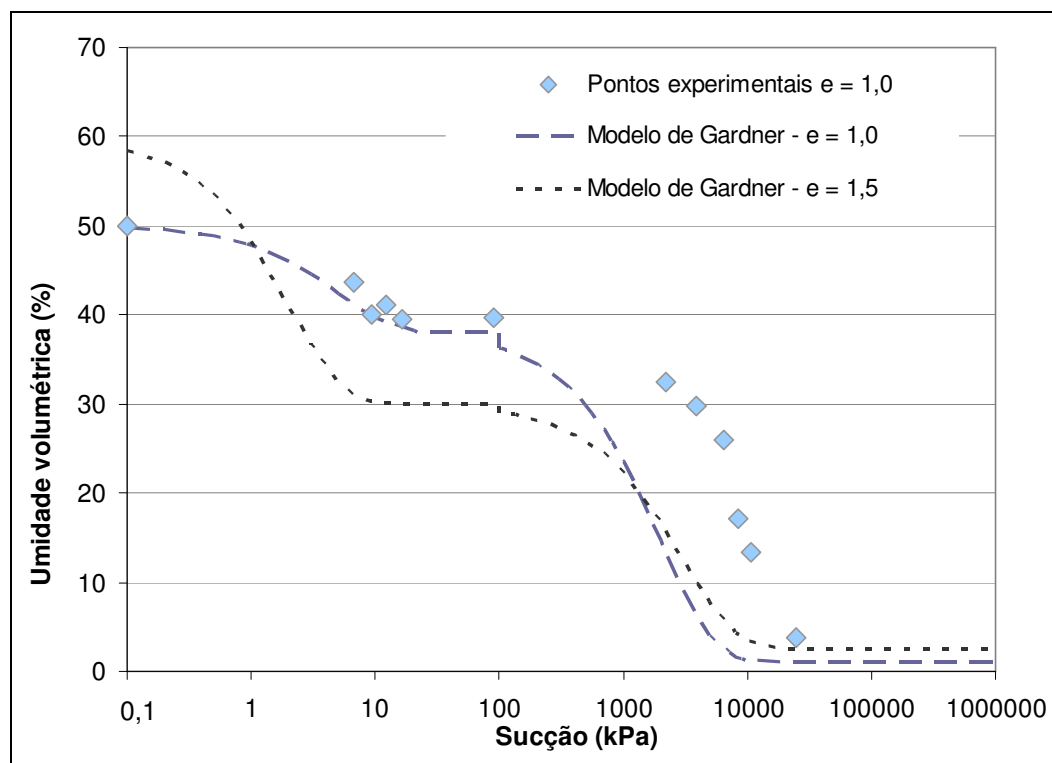


FIGURA 3.18 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE AJUSTADA PELO MODELO DE GARDNER PARA O SOLO SILTOSO 1.

TABELA 3.9 – PARÂMETROS DE VAN GENUCHTEN E DE GARDNER PARA O SOLO SILTOSO 1.

Parâmetros	$\gamma_d = 13,93 \text{ kN/m}^3$ (e = 1,0)		$\gamma_d = 11,09 \text{ kN/m}^3$ (e = 1,5)	
	Ajuste 1	Ajuste 2	Ajuste 1	Ajuste 2
	< 100 kPa	> 100 kPa	< 100 kPa	> 100 kPa
Umidade volumétrica na saturação (%)*	50	38	60	30
Umidade volumétrica residual (%)*	38	1	30	2,5
Parâmetro n de ajuste de van Genuchten*	3,0	2,0	3,0	2,8
Parâmetro α de ajuste de van Genuchten (kPa^{-1})*	0,20	0,00025	0,35	0,00018
Parâmetro b de ajuste de Gardner (kPa^{-1})**	0,20	0,0005	0,50	0,0003

* Fonte: Guizelini (2011).

** O valor do parâmetro b do modelo de Gardner foi calculado considerando o inverso do valor de entrada de ar no solo.

3.1.2.4 Condutividade hidráulica saturada

A condutividade hidráulica saturada do silte 1 foi determinada por meio de ensaio de carga variável. Para execução do ensaio utilizou-se uma bureta conectada a uma célula de adensamento. A configuração da célula com acoplamento da bureta é apresentada na Figura 3.19.



FIGURA 3.19 – CONFIGURAÇÃO DA CÉLULA DE ADENSAMENTO PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA VARIÁVEL.

Para execução do ensaio foram moldadas diretamente no anel de adensamento amostras do solo siltoso com as mesmas características das amostras utilizadas para os ensaios de condutividade hidráulica não saturada. Procedeu-se ao ensaio de adensamento sendo que, ao final de cada estágio de tensão, o fluxo de água da bureta para o solo era liberado e determinava-se a condutividade hidráulica saturada medindo a variação da altura de água na bureta ao longo do tempo, conforme Equação 2.50.

A condutividade hidráulica saturada também foi computada através dos parâmetros do ensaio de adensamento, Equação 2.51. Os parâmetros da amostra bem como os resultados desse ensaio são apresentados na Tabela 3.10.

TABELA 3.10 – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO SILTOSO 1 OBTIDA POR MEIO DE ENSAIO DE ADENSAMENTO E ENSAIO DE CARGA VARIÁVEL.

Amostra	Tensão aplicada (kPa)	Índice de vazios final	Coeficiente de adensamento (cv - m ² /s)	Coeficiente de compressibilidade (av - 1/kPa)	Condutividade hidráulica saturada (m/s)	
					Carga variável	Parâmetros adensamento
1	13	1,045	$3,24 \times 10^{-7}$	$6,23 \times 10^{-4}$	$5,76 \times 10^{-7}$	$9,69 \times 10^{-10}$
	26	1,037	$7,62 \times 10^{-9}$	$6,23 \times 10^{-4}$	$5,39 \times 10^{-7}$	$2,29 \times 10^{-11}$
2	4	1,623*	$1,17 \times 10^{-7}$	$6,42 \times 10^{-3}$	$2,56 \times 10^{-6}$	$2,82 \times 10^{-9}$
	26	1,486	$6,90 \times 10^{-7}$	$1,33 \times 10^{-2}$	$1,27 \times 10^{-7}$	$1,61 \times 10^{-8}$
	51	1,143	$6,39 \times 10^{-8}$	$2,89 \times 10^{-3}$	$1,71 \times 10^{-6}$	$4,79 \times 10^{-9}$
	105	0,988	$2,75 \times 10^{-8}$	$2,89 \times 10^{-3}$	$9,87 \times 10^{-7}$	$3,30 \times 10^{-9}$

* A etapa inicial do adensamento foi realizada em tempo inferior a 24 horas.

Guizelini (2011) havia estimado a condutividade hidráulica do solo siltoso 1 através do estágio de consolidação de amostras inundadas em ensaios de cisalhamento direto. A condutividade hidráulica foi estimada para cada estágio de carregamento de dois grupos de ensaios de cisalhamento direto. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.11 e Figura 3.20.

TABELA 3.11 – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO SILTOSO 1 OBTIDA POR MEIO DE ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO – ESTÁGIO DE CONSOLIDAÇÃO.

Ensaio	Tensão (kPa)	e_0	e_f	Δe	a_v	c_v	K_{sat} (m/s)
1	50	0,95	0,86	0,09	0,00181	$1,05 \times 10^{-6}$	$9,74 \times 10^{-9}$
	100	0,90	0,79	0,11	0,00110	$1,52 \times 10^{-6}$	$8,79 \times 10^{-9}$
	200	0,98	0,76	0,23	0,00115	$3,62 \times 10^{-7}$	$2,09 \times 10^{-9}$
	400	0,94	0,42	0,52	0,00130	$1,87 \times 10^{-7}$	$1,26 \times 10^{-9}$
2	20	1,42	1,37	0,05	1,00263	$2,82 \times 10^{-6}$	$3,07 \times 10^{-8}$
	40	1,45	1,33	0,12	0,00290	$2,52 \times 10^{-6}$	$2,98 \times 10^{-8}$
	80	1,53	1,27	0,27	0,00337	$1,18 \times 10^{-6}$	$1,57 \times 10^{-8}$

Fonte: Guizelini (2011).

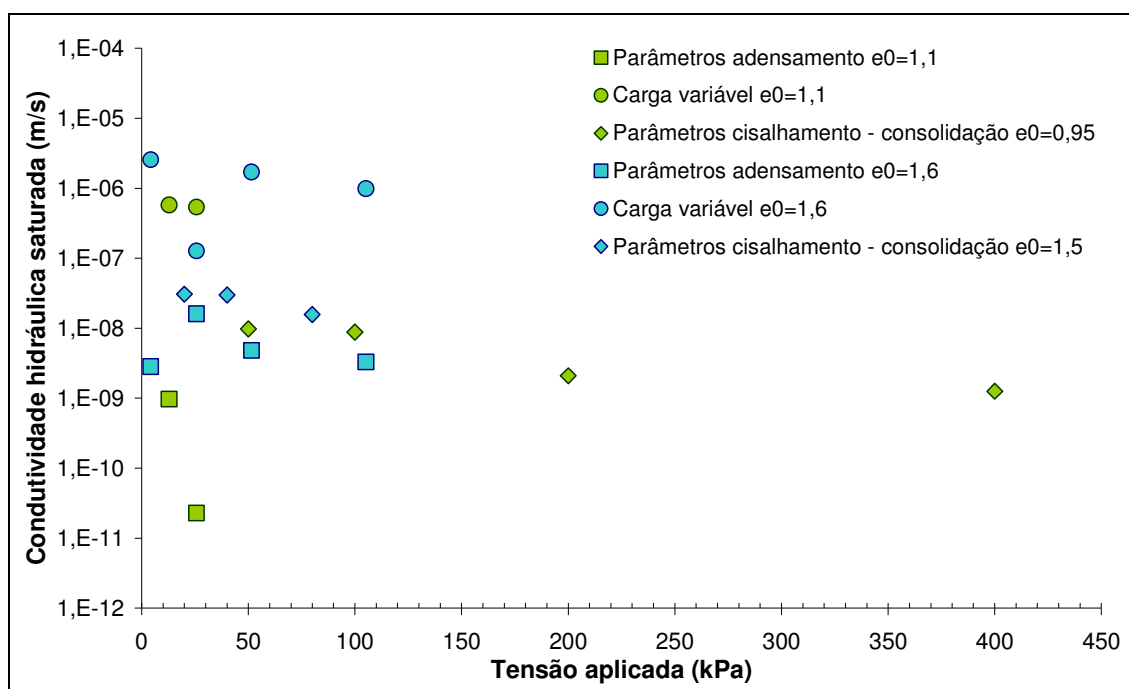


FIGURA 3.20 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA PARA SOLO SILTOSO 1.

Verifica-se que para cada ensaio (carga variável, adensamento e cisalhamento direto), é apresentada uma estimativa da condutividade hidráulica saturada em função da tensão aplicada (Figura 3.20). As estimativas obtidas por meio de ensaio de adensamento (Equação 2.51) ficam de uma a até três ordens de grandeza abaixo das obtidas por meio do ensaio de carga variável.

A condutividade hidráulica saturada possui valores maiores para menores índices de vazios. Os valores de condutividade foram obtidos para diferentes condições de tensão aplicada alterando o índice de vazios da

amostra, de forma que os resultados são representativos para definir uma ordem de magnitude da condutividade hidráulica.

As estimativas obtidas através do ensaio de carga variável são medidas mais diretas da condutividade, se comparadas aos valores estimados por meio dos parâmetros de adensamento. Por esse motivo, o valor de referência da condutividade hidráulica saturada do silte 1 foi considerado como a condutividade obtida através deste ensaio, sendo de $5,6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ para índice de vazios unitário, e de $1,3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ para índice de vazios igual a 1,5.

O valor da condutividade hidráulica saturada foi utilizado para obtenção da Função-K através dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner, cujas curvas são apresentadas na Figura 3.21.

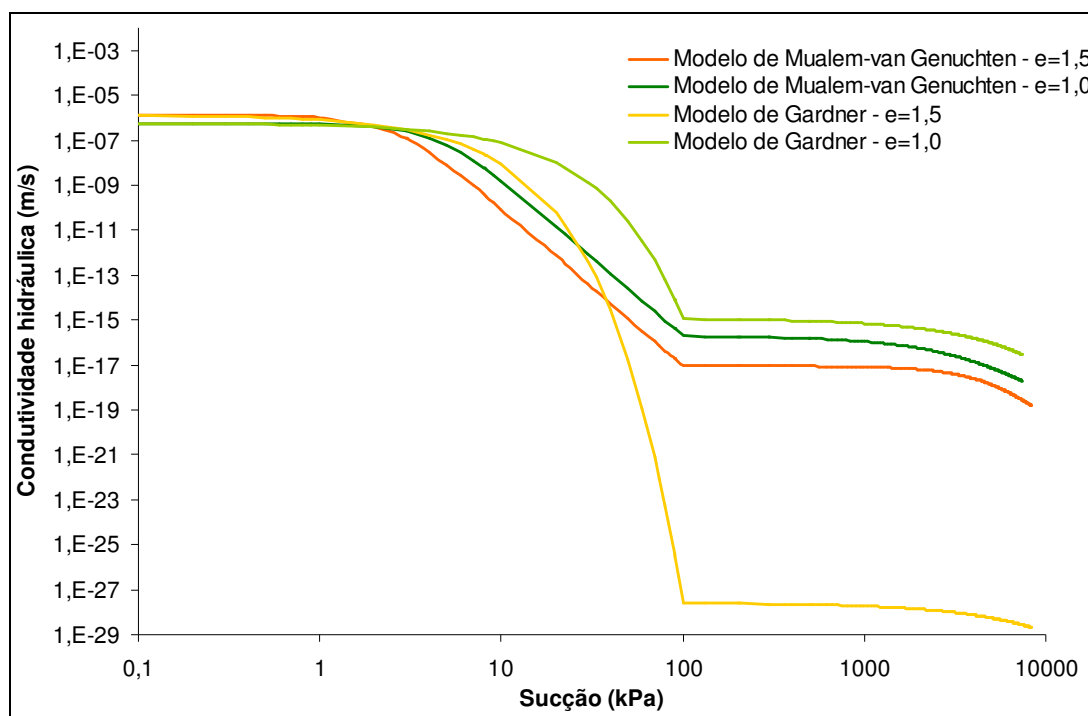


FIGURA 3.21 – PREVISÃO DAS FUNÇÕES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SILTE 1 ATRAVÉS DOS MODELOS DE MUALEM-VAN GENUCHTEN E DE GARDNER.

3.1.3 Silte 2

3.1.3.1 Granulometria, consistência e classificação

A curva granulométrica para este solo é representada na Figura 3.22. Pela análise da curva granulométrica verifica-se que mais de 80% da amostra

possui partículas menores que 0,075mm, referente à peneira #200, o que caracteriza o material como um solo fino. A porcentagem de cada fração (pedregulho, areia, silte e argila, conforme definição da ABNT) encontrada na amostra é apresentada na Tabela 3.12.

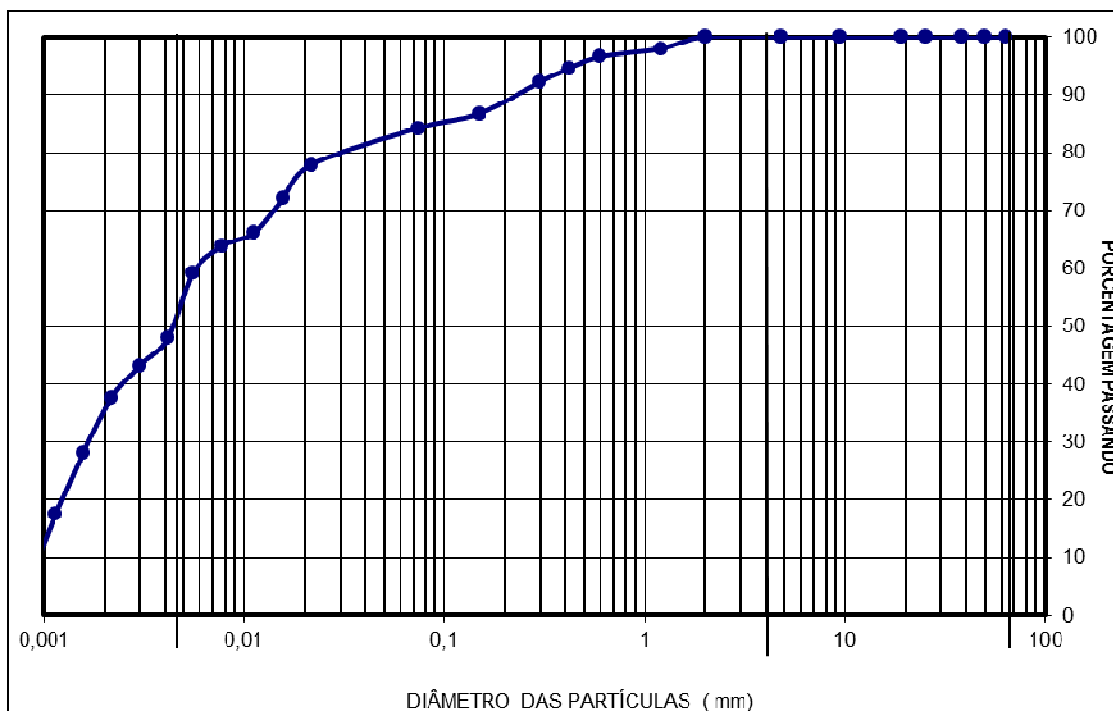


FIGURA 3.22 – CURVA GRANULOMÉTRICA PARA SOLO FINO 2.

TABELA 3.12 – PORCENTAGENS DAS FRAÇÕES DE PARTÍCULAS DO SOLO FINO 2, CONFORME CLASSIFICAÇÃO ABNT (NBR 6502).

Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
0%	0%	5,43%	16,67%	49,74%	28,15%

Os resultados dos ensaios para densidade real dos grãos (G) e limites de Attenberg são apresentados na Tabela 3.13.

TABELA 3.13 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO PARA O SOLO FINO 2.

G	LL (%)	LP (%)	IP (%)
2,63	43	36	7

Com base nessas características, o solo classifica-se como ML– Silte inorgânico de baixa plasticidade, pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), e como solo siltoso do grupo A-5, pelo sistema proposto pela “American Association of State Highway and Transportation Officials” (AASHTO).

3.1.3.2 Curva de retenção de umidade do solo (CRUS)

A determinação da CRUS foi efetuada através do método do papel filtro, normalizado pela ASTM D 5298/94. A descrição desse método foi apresentada previamente no Capítulo 2 (item 2.1.4.1).

Foram moldadas 12 amostras em anéis de PVC de 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro. As amostras foram moldadas com peso específico em torno de 17,85 kN/m³ e umidade gravimétrica de 30%, em condição similar a utilizada para as amostras dos ensaios em centrífuga e permeâmetro. As umidades desejadas foram previamente calculadas a fim de garantir uma boa distribuição de pontos na CRUS. Assim, algumas amostras foram umedecidas e outras secadas ao ar e suas massas foram monitoradas até atingirem o valor calculado.

TABELA 3.14 – DADOS DO ENSAIO DE PAPEL FILTRO PARA SOLO SILTOSO 2.

Amostra	Peso específico seco (kN/m ³)	Índice de vazios	Porosidade (%)	Processo	Umidade gravimétrica final (%)	Umidade volumétrica final (%)	Grau de saturação (%)
1	13,99	0,845	45,8	Secagem	7,46	10,64	23,2
2	13,71	0,882	46,9	Secagem	10,68	14,93	31,9
3	13,78	0,872	46,6	Secagem	21,04	29,56	63,5
4	13,84	0,864	46,4	Secagem	25,76	36,34	78,4
5	13,90	0,856	46,1	Umedecimento	27,83	39,43	85,5
6	13,78	0,872	46,6	Umedecimento	31,56	44,33	95,2
7	13,70	0,884	46,9	Secagem	1,62	2,26	4,8
8	13,63	0,893	47,2	Secagem	2,32	3,23	6,8
9	14,00	0,843	45,8	Secagem	3,81	5,43	11,9
10	13,84	0,864	46,3	Secagem	8,18	11,54	24,9
11	13,70	0,884	46,9	Secagem	11,08	15,48	33,0
12	13,62	0,895	47,2	Secagem	14,59	20,26	42,9
Média	13,79	0,871	46,6	-	-	-	-

Para as amostras que necessitaram de umedecimento, adicionou-se água destilada em quantidade previamente calculada e, então, as amostras foram seladas com plástico filme, papel alumínio, saco plástico e deixadas em uma caixa de isopor por 24 horas a fim de garantir a homogeneização da umidade. Para as amostras que necessitaram de secagem, as mesmas foram expostas ao ar ambiente e monitorou-se a massa ao longo do tempo até atingir o valor previamente especificado, momento em que os corpos de prova foram selados com plástico filme para evitar maiores perdas de umidade.

Uma vez atingido o valor de umidade requerido para cada amostra, procedeu-se a colocação do papel filtro em contato com o solo. Como o objetivo era conhecer apenas a sucção mátrica do solo, o papel filtro foi colocado diretamente em contato com o solo. Em cada amostra foram colocados três papéis filtro sobrepostos, conforme indicado por Fredlund e Rahardjo (1993), sendo o papel do meio utilizado para a medição e os adjacentes para proteger o papel central da contaminação do próprio solo e externa (Figura 3.23). Acima dos papéis foi colocada uma rede de PVC para proteger o papel do contato com o plástico filme, o qual foi utilizado para envolver o conjunto de amostra e papéis filtro após posicionamento destes.

A embalagem do conjunto foi feita com plástico filme, papel alumínio e saco plástico com fechamento do tipo *zip lock*. As amostras devidamente embaladas foram colocadas em caixa de isopor, garantindo assim que não haveria perda de umidade durante o período de equalização (Figura 3.24).

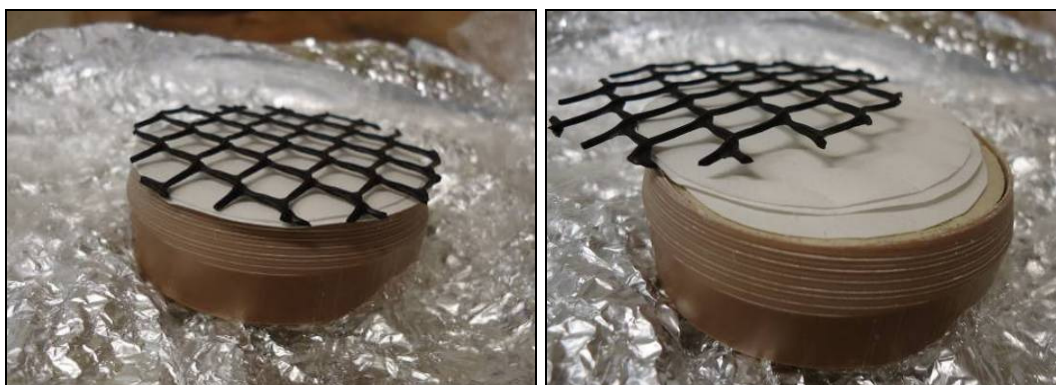


FIGURA 3.23 – DISPOSIÇÃO DOS PAPÉIS FILTRO E REDE DE PVC SOBRE A MOSTRA.



FIGURA 3.24 – EMBALAGEM DAS AMOSTRAS PARA EQUALIZAÇÃO.

Da mesma forma que realizado por Guizelini (2011), os papéis filtro foram utilizados sem secagem previamente, assim apresentavam certa umidade ambiente. Para eventuais necessidades de correção, os papéis foram pesados antes de serem colocados nas amostras.

Após o período de equalização de 7 dias para sucção mátrica (Fredlund e Rahardjo, 1993) os papéis foram retirados das amostras, com auxílio de pinça e luvas para que não houvesse contato direto com as mãos (o que poderia interferir na massa do papel) e transferidos rapidamente para uma balança com precisão de 0,0001 g. No momento em que o papel filtro foi exposto ao ar ambiente acionou-se um cronômetro e efetuou-se a leitura da massa do papel a cada 10 segundos durante 3 minutos. Esse procedimento, descrito por Lopes (2006) e Soares (2008), permite que seja estimado o peso do papel filtro no momento em que ele foi retirado do contato com o solo por meio da elaboração de um gráfico de peso do papel filtro em função do tempo e extrapolação do peso para um tempo zero.

A amostra de solo foi pesada e extraída do anel de PVC para secagem em estufa com temperatura entre 100°C e 110°C, por um período mínimo de 24 horas.

Após a pesagem dos papéis, estes também foram transferidos para estufa por um período mínimo de 2 horas. Depois de secados seguiu-se o mesmo procedimento de pesagem realizado para os papéis úmidos, com obtenção do peso seco no tempo zero através do método gráfico.

Com base na massa seca e massa úmida, determinou-se a umidade gravimétrica do papel filtro e, por meio da curva de calibração do mesmo, obteve-se a sucção do papel e do solo. Nesse estudo foi utilizado o papel filtro

da marca Whatman Nº 42, cujas curvas de calibração foram propostas por Chandler *et al.* (1992) e apresentadas nas Equações 2.13 e 2.14. Com as sucções determinadas pelo papel filtro, relacionadas com as umidades volumétricas das amostras correspondentes, obteve-se a curva característica do material (Figura 3.25).

A umidade volumétrica na saturação foi determinada pelo cálculo da porosidade média das amostras utilizadas, resultando no valor de 46,4%. O maior grau de saturação obtido pelo umedecimento das amostras foi de 95%. O valor da sucção na saturação (46,4%) foi considerado nulo.

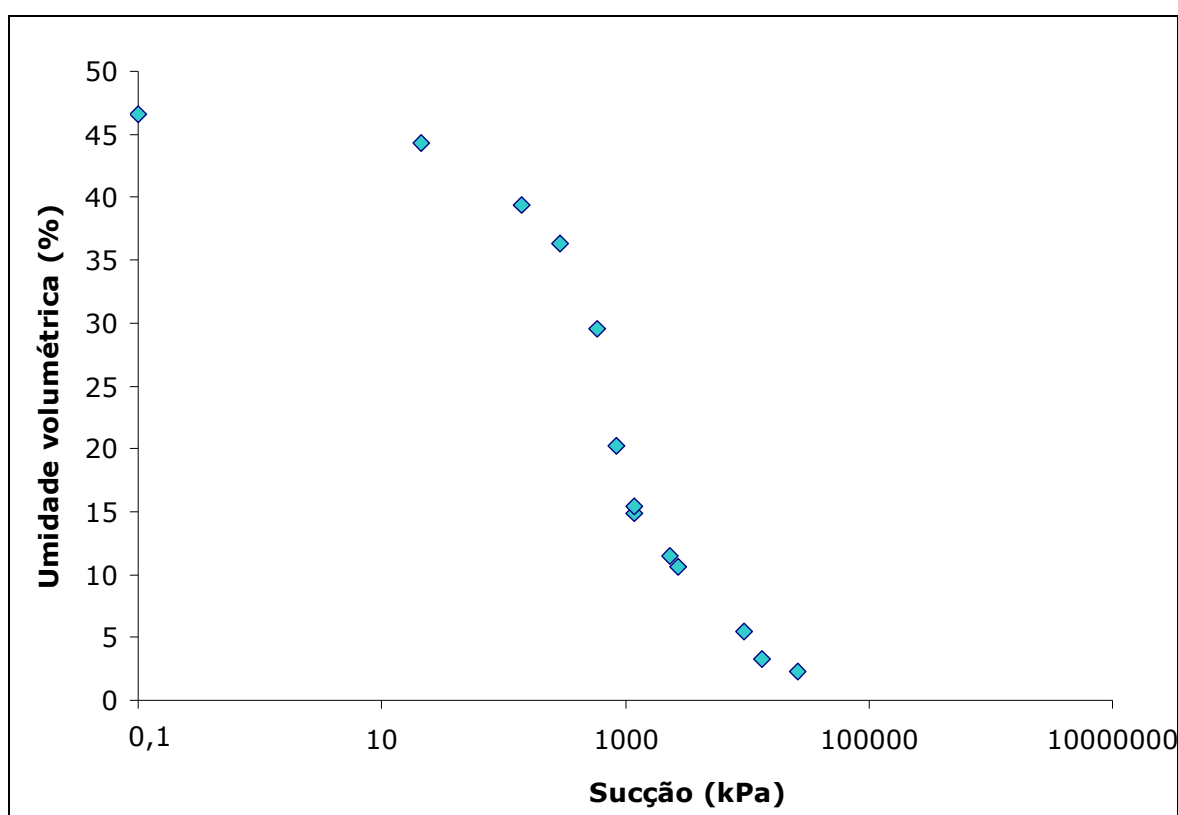


FIGURA 3.25 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO SILTOSO 2 EM FUNÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA.

Aos pontos experimentais foram ajustadas curvas pelos modelos de van Genuchten e de Gardner (Figura 3.26 e Tabela 3.15).

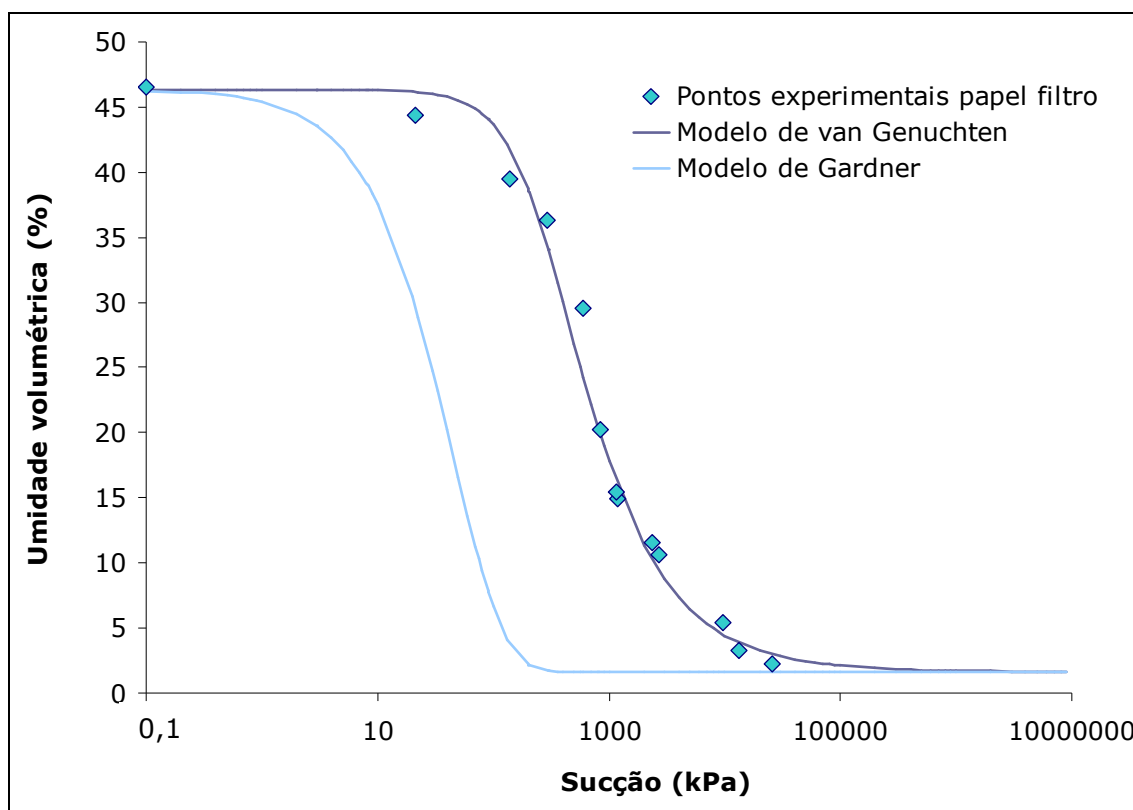


FIGURA 3.26 – CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE AJUSTADA PELOS MODELOS DE VAN GENUCHTEN E DE GARDNER PARA O SOLO SILTOSO 2.

TABELA 3.15 – PARÂMETROS DE VAN GENUCHTEN E DE GARDNER PARA O SOLO SILTOSO 2.

Parâmetros	Valor
Umidade volumétrica na saturação (%)	46,4
Umidade volumétrica residual (%)	1,7
Parâmetro n de ajuste de van Genuchten	1,78
Parâmetro α de ajuste de van Genuchten (kPa^{-1})	0,0035
Parâmetro b de ajuste de Gardner (kPa^{-1})*	0,022

* O valor do parâmetro b do modelo de Gardner foi calculado considerando o inverso do valor de entrada de ar no solo.

3.1.3.3 Umidade residual

Da mesma forma que para a areia, a umidade residual foi obtida por meio de secagem ao ar. A secagem para determinação da umidade residual foi realizada durante o procedimento de obtenção das amostras para ensaio de papel filtro, visto que para a determinação da CRUS utilizou-se uma amostra na umidade residual.

Como descrito anteriormente, o solo foi moldado em anéis de PVC com peso específico de $17,85 \text{ kN/m}^3$ e umidade gravimétrica de 30%. Para

obtenção da umidade residual foi necessário deixar o solo exposto ao ar ambiente por 7 dias. A umidade gravimétrica residual obtida com esse procedimento foi de 1,18% e a volumétrica foi de 1,65%.

3.1.3.4 Condutividade hidráulica saturada

Da mesma forma efetuada para o solo siltoso 1, a condutividade hidráulica saturada do solo siltoso 2 foi obtida através de ensaio de carga variável após estágio de adensamento, utilizando bureta graduada conectada à célula de adensamento. Para cada estágio de adensamento foi determinada a condutividade hidráulica saturada através da formulação de ensaio em carga variável (Equação 2.50) e por meio dos parâmetros do adensamento (Equação 2.51).

Para esse ensaio foi moldada no anel de adensamento uma amostra do solo siltoso 2 com as seguintes características: umidade gravimétrica inicial de 26,98%, peso específico seco de 14,14 kN/m³ e índice de vazios inicial de 0,825. Os parâmetros do ensaio de adensamento, bem como os resultados de condutividade hidráulica saturada, obtidos pelos dois métodos utilizados são apresentados na Tabela 3.16.

TABELA 3.16 – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO SILTOSO 2 OBTIDA POR MEIO DE ENSAIO DE ADENSAMENTO E ENSAIO DE CARGA VARIÁVEL.

Tensão aplicada (kPa)	Índice de vazios final	Coeficiente de adensamento ($c_v - m^2/s$)	Coeficiente de compressibilidade ($a_v - 1/kPa$)	Condutividade hidráulica saturada (m/s)	
				Carga variável	Parâmetros adensamento
24	0,822	$1,04 \times 10^{-8}$	$1,24 \times 10^{-3}$	$6,48 \times 10^{-9}$	$6,93 \times 10^{-11}$
50	0,789	$4,91 \times 10^{-8}$	$1,07 \times 10^{-3}$	$5,44 \times 10^{-9}$	$2,87 \times 10^{-10}$
72	0,766	$1,00 \times 10^{-7}$	$6,83 \times 10^{-4}$	$8,83 \times 10^{-10}$	$3,80 \times 10^{-10}$
163	0,704	$1,80 \times 10^{-7}$	$4,37 \times 10^{-4}$	$1,74 \times 10^{-11}$	$4,53 \times 10^{-10}$
292	0,647	$2,67 \times 10^{-8}$	$3,10 \times 10^{-4}$	$1,17 \times 10^{-10}$	$4,92 \times 10^{-11}$
453	0,597	$1,86 \times 10^{-8}$	$2,24 \times 10^{-4}$	$9,62 \times 10^{-11}$	$2,56 \times 10^{-11}$
657	0,552	$2,48 \times 10^{-8}$	$2,24 \times 10^{-4}$	$5,08 \times 10^{-11}$	$3,50 \times 10^{-11}$

As tensões a serem aplicadas durante o adensamento foram definidas com base nas pressões que seriam impostas ao solo durante o ensaio em centrífuga. Apesar das forças de pressão aplicadas através desses ensaios

serem diferentes (uma caracteriza-se por pressão de compressão e a outra por aceleração do núcleo do solo induzindo uma sucção no mesmo) optou-se por aplicar esses valores de tensão a fim de verificar possíveis variações na condutividade hidráulica saturada do solo.

Conforme os resultados apresentados na Figura 3.27, verifica-se que, para a maioria das tensões aplicadas, a condutividade hidráulica saturada obtida por meio dos parâmetros do ensaio de adensamento ficou abaixo dos valores obtidos através do ensaio de carga variável. Esta diferença entre os resultados de um e outro ensaio pode advir da possibilidade de existência de fluxo preferencial da água durante o ensaio de carga variável realizado em célula de adensamento.

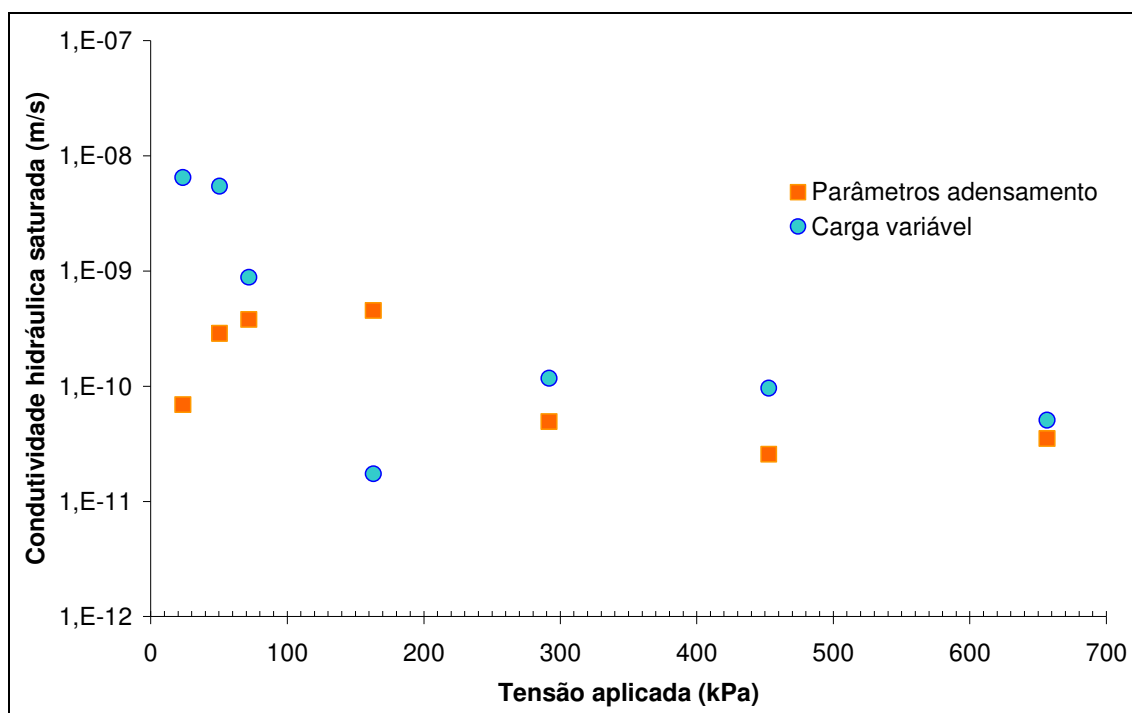


FIGURA 3.27 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA PARA O SOLO SILTOSO 2.

A condutividade hidráulica saturada de referência para o solo siltoso 2 foi definida como o resultado do primeiro ensaio de carga variável realizado após o estágio de adensamento com aplicação de tensão de 24 kPa, pois nesta condição o valor do índice de vazios fica mais próximo à condição na qual as amostras foram moldadas, tanto para ensaio em centrífuga, quanto para ensaio em permeâmetro.

A Figura 3.28 indica a Função-K para o solo siltoso 2 obtida através dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner, que têm como base o ajuste da CRUS e a condutividade hidráulica saturada de referência definida por meio dos ensaios anteriormente descritos.

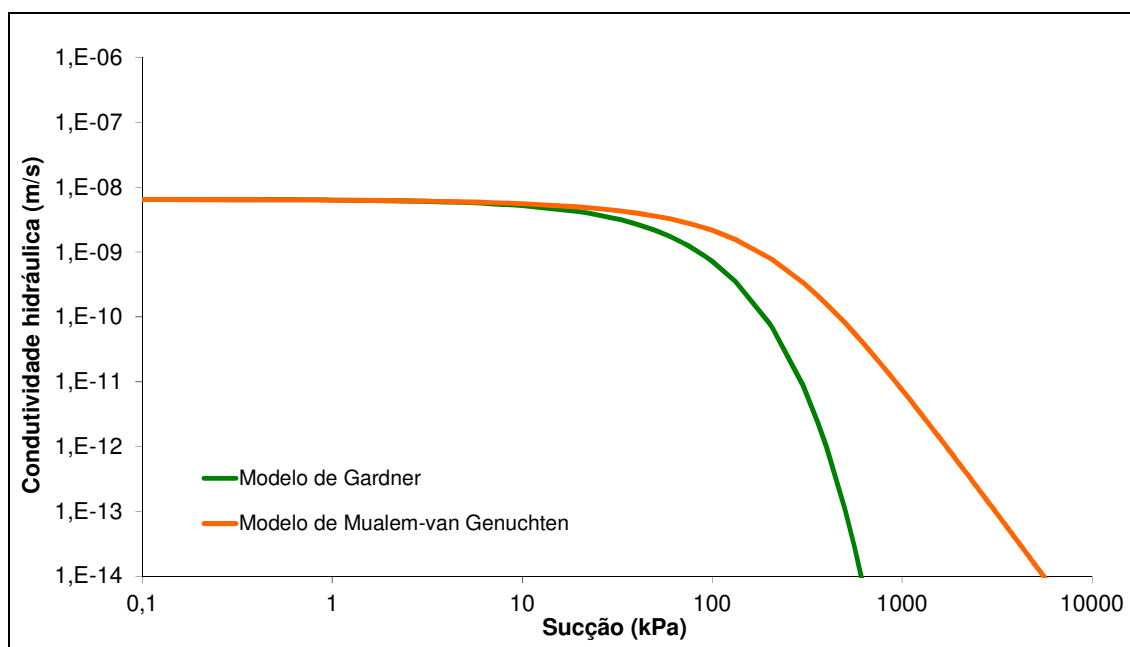


FIGURA 3.28 – PREVISÃO DAS FUNÇÕES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SILTOSO 2 ATRAVÉS DOS MODELOS DE MUALEM-VAN GENUCHTEN E DE GARDNER.

3.2 DETERMINAÇÃO DA CRUS E FUNÇÃO K EM CENTRÍFUGA DE PEQUENA ESCALA

Os ensaios em centrífuga foram realizados a partir das seguintes etapas:

- moldagem das amostras de solo;
- montagem do equipamento;
- ensaio para curva de retenção de umidade do solo, e
- ensaio para condutividade hidráulica não saturada.

A determinação da condutividade hidráulica em centrífuga foi realizada apenas para os solos finos, de mais baixa permeabilidade. As metodologias utilizadas, tanto para a determinação da curva de retenção de umidade quanto da Função-K, foram propostas por Reis *et al.* (2011) e Sterck (2011).

3.2.1 Descrição da centrífuga

A centrífuga utilizada para os ensaios de condutividade hidráulica não saturada pertence ao Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) localizada em Campo dos Goytacazes, RJ.

Consiste em uma centrífuga de pequena escala da marca Cientec, modelo CT6000, a qual foi especialmente modificada para permitir a colocação de quatro amostras de solo para ensaio simultâneo. A velocidade máxima de trabalho é de 3500 rpm, para rotor horizontal, e de 6000 rpm, para ângulo fixo.

O equipamento não permite instrumentação interna, tanto para determinação da velocidade de fluxo quanto do perfil de umidade/sucção da amostra de solo. Apresenta com isso a vantagem de poder ser utilizado para ensaios em amostras indeformadas visto que não haverá interferência da instrumentação.

A Figura 3.29 indica a configuração geral da centrífuga.

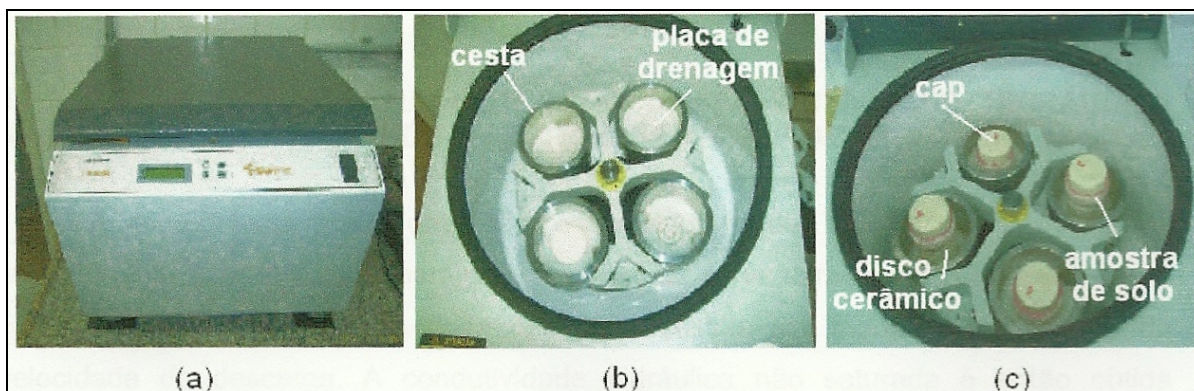


FIGURA 3.29 – CONFIGURAÇÃO GERAL DA CENTRÍFUGA: (a) VISTA EXTERNA; (b) E (c) VISTA INTERNA.

Fonte: Sterck (2011).

Cada um dos quatro compartimentos da centrífuga apresenta a configuração básica de um reservatório de água localizado abaixo de uma placa drenante, a qual, por sua vez, fica sob um disco cerâmico. Acima do disco cerâmico é colocada a amostra de solo previamente moldada em anel de PVC de 2 cm de altura e 5 cm de diâmetro. O anel de PVC com a amostra de solo é colocado no interior de outro anel mais espesso, também de PVC, o qual tem a função de garantir que não haja deformação horizontal e também serve como suporte para o cap de PVC colocado sobre a amostra com o objetivo de evitar a evaporação da água do solo (Figura 3.30).

Entre o disco cerâmico e a amostra de solo é inserido um papel filtro saturado com a função de inibir a migração de partículas do solo para dentro do material cerâmico durante o ensaio. Acima do cilindro com a amostra de solo coloca-se um *cap* de alumínio. A Figura 3.31 apresenta a configuração dos componentes internos da centrífuga.



FIGURA 3.30 – CONJUNTO DE PVC PARA COLOCAÇÃO DAS AMOSTRAS: ANÉIS E CAP.

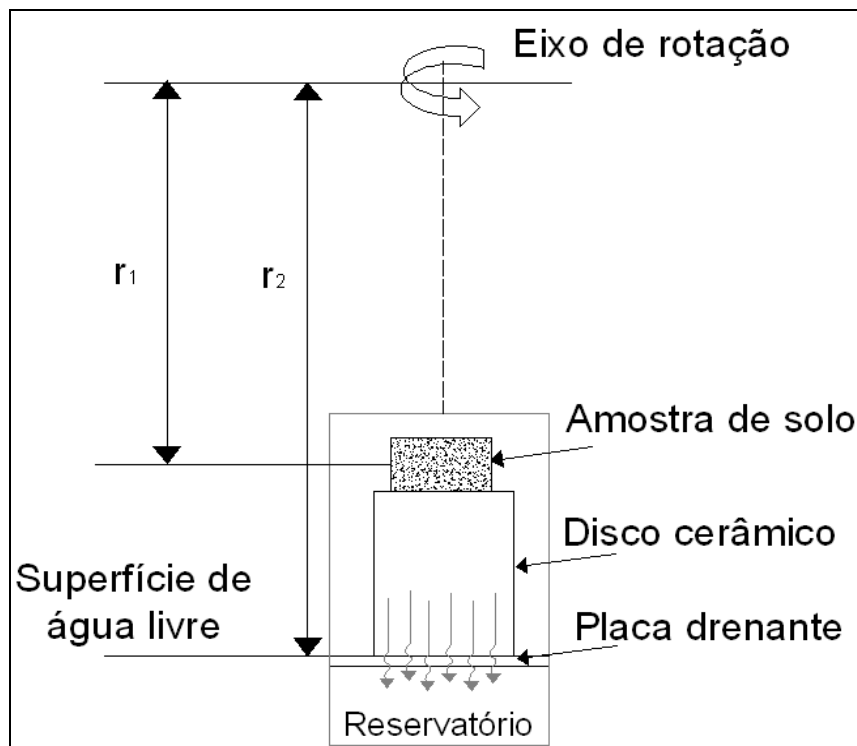


FIGURA 3.31 – CONFIGURAÇÃO DOS COMPONENTES INTERNOS DA CENTRÍFUGA.

Fonte: Sterck (2011).

A placa drenante tem como função induzir uma superfície drenante livre na fronteira inferior do disco cerâmico de forma que todo o fluxo de água vindo da drenagem da amostra de solo seja transmitido ao reservatório de coleta inferior.

O disco cerâmico apresenta duas funções importantes: posicionar a amostra de solo a certa distância em relação ao eixo de rotação da centrífuga, e atuar como uma superfície de gotejamento na base da amostra de solo de forma que a taxa de fluxo de saída seja dependente da condutividade hidráulica saturada do solo e da gravidade induzida aplicada. Foram utilizados no equipamento discos cerâmicos com três espessuras diferentes: 13 mm, 24 mm e 50 mm. Os discos foram fabricados especialmente para este fim, através de misturas específicas de caulim e água. Apresentam porosidade de aproximadamente 48% e K_{sat} da ordem de 10^{-4} cm/s. A Figura 3.32 mostra os discos cerâmicos de 13 mm e 50 mm.



FIGURA 3.32 – DISCOS CERÂMICOS.

A sucção em qualquer ponto da amostra de solo centrifugada é calculada com base na Equação 3.2, proposta por Gardner (1937) e utilizada por Corey (1977).

$$\psi = \frac{\rho_w \omega^2}{2g} (r_2^2 - r_1^2) \quad (3.2)$$

A Equação 3.2 apresenta a sucção em função das dimensões da centrífuga e da amostra, sendo r_1 a distância do eixo de rotação da centrífuga até o ponto na amostra no qual se deseja obter a sucção e r_2 a distância do centro de rotação até a placa drenante (Figura 3.31). A distância r_2 é mantida constante durante o ensaio (13,96 cm – para os recipiente 1 e 3, e 16,38 cm – para os recipientes 2 e 4).

Verifica-se pela Equação 3.2 que a utilização de discos cerâmicos com espessuras diferentes permite a indução de diferentes valores de sucção à amostra de solo em certa velocidade de rotação. A magnitude de sucção aplicada também é alterada pela variação da velocidade angular da centrífuga (Figura 3.33). A Tabela 3.17 apresenta as dimensões internas da centrífuga, r_1 em relação aos discos cerâmicos utilizados. A Tabela 3.18 indica as diferentes magnitudes de sucção impostas às amostras do solo em centrífuga em função da altura do disco cerâmico utilizado e da velocidade angular de rotação.

TABELA 3.17 – DISTÂNCIAS DO EIXO DE ROTAÇÃO A DIFERENTES ALTURAS DA AMOSTRA (R_1) PARA DIFERENTES DISCOS CERÂMICOS.

Altura do disco (mm)	r_1 (cm)		
	Topo	Centro	Base
13	10,65	11,65	12,65
24	11,99	12,99	13,99
50	9,35	10,35	11,35

TABELA 3.18 – MAGNITUDES DE SUCÇÃO IMPOSTAS EM FUNÇÃO DA ALTURA DO DISCO CERÂMICO E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO.

Velocidade angular (rpm)	Sucção (kPa)								
	Disco 13 mm ($r_2 = 13,96$ cm)			Disco 24 mm ($r_2 = 16,38$ cm)			Disco 50 mm ($r_2 = 16,38$ cm)		
	Topo	Centro	Base	Topo	Centro	Base	Topo	Centro	Base
300	4,1	3,0	1,8	6,3	5,0	3,7	9,1	8,1	7,0
500	11,4	8,3	4,9	17,4	14,0	10,2	25,3	22,5	19,5
1000	45,6	33,1	19,5	69,8	55,8	40,7	101,2	90,2	78,1
1500	102,6	74,5	43,9	157,0	125,6	91,7	227,7	202,9	175,6
2000	182,3	132,5	78,1	279,1	223,3	163,0	404,8	360,8	312,2
2500	284,9	207,0	122,1	436,1	348,8	254,6	632,5	563,7	487,9
3000	410,2	298,0	175,8	627,9	502,3	366,7	910,8	811,7	702,6

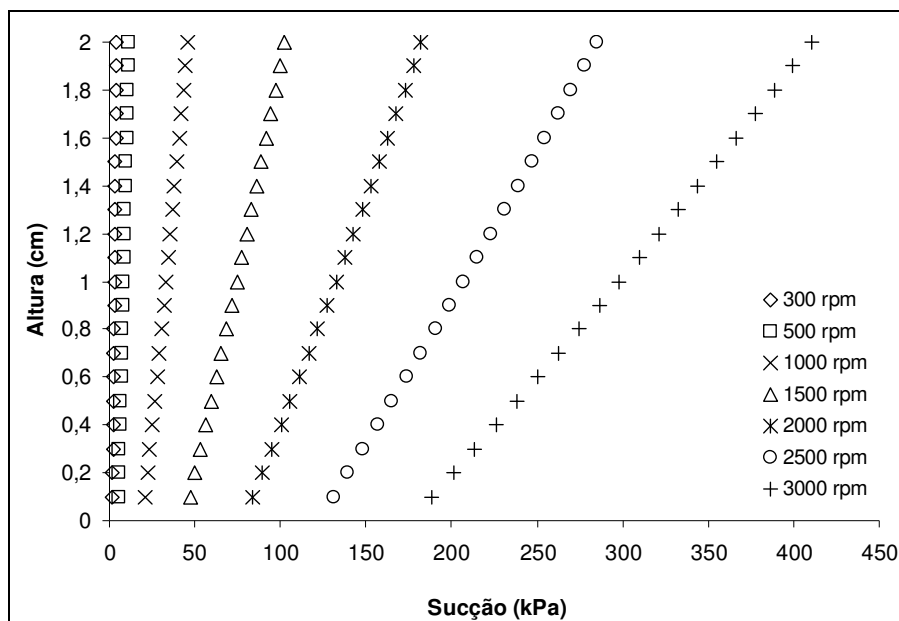


FIGURA 3.33 – PERFIS DE SUCÇÃO PARA DIFERENTES VELOCIDADES ANGULARES IMPOSTAS (DISCO DE 13 MM).

Para verificar a validade da Equação 3.2, Sterck (2011) realizou vários ensaios em centrífuga, comparando a sucção calculada pela equação ao valor de sucção medido por meio de métodos convencionais para CRUS associado ao teor de umidade ao final de cada estágio de aceleração da centrífuga. Os métodos consagrados do funil de placa porosa, câmara de pressão e papel

filtro foram utilizados no referido estudo. Estes métodos foram escolhidos pela necessidade de determinação da sucção do solo em uma ampla faixa de valores, desde sucções baixas (medidas através do funil de placa porosa), intermediárias (câmara de pressão), até mais elevadas (papel filtro). Segundo o autor, apesar de apresentarem princípios diferentes, os dados experimentais de CRUS obtidos através dos ensaios em centrífuga de pequena escala utilizando a Equação 3.2 para definição da sucção na amostra de solo mostraram boa concordância com os dados experimentais obtidos pelos métodos convencionais citados, indicando o excelente potencial do uso desta metodologia para obtenção da CRUS (Sterck, 2011).

TABELA 3.19 - NÍVEIS DE GRAVIDADE INDUZIDOS NO CENTRO DA AMOSTRA PARA CADA VELOCIDADE ANGULAR APLICADA.

Velocidade angular (rpm)	Nível de gravidade induzida		
	Disco 13 mm ($r_2 = 13,96$ cm)	Disco 24 mm ($r_2 = 16,38$ cm)	Disco 50 mm ($r_2 = 16,38$ cm)
300	11,7	13,1	10,4
500	32,6	36,3	28,9
1000	130,3	145,2	115,7
1500	293,1	326,6	260,3
2000	521,0	580,6	462,8
2500	814,1	907,2	723,1
3000	1172,3	1306,4	1041,2

O equipamento comporta quatro amostras de solo simultaneamente, permitindo que sejam feitas análises concomitantes com diferentes discos cerâmicos e/ou diferentes solos. No entanto, para evitar desbalanceamento da centrífuga é necessário que os discos cerâmicos sejam dispostos simetricamente em seu interior, ou seja, discos com iguais alturas devem ser colocados em cestas localizadas em lados opostos em relação ao eixo de rotação da centrífuga.

3.2.2 Moldagem das amostras de solo

Para o método em centrífuga são utilizadas amostras de dimensões pequenas, moldadas em anéis de PCV de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura.

Para cada um dos solos finos foram utilizadas duas amostras em cada ensaio, de forma que os ensaios para CRUS e Função-K em ambos os solos

foram conduzidos simultaneamente. Durante a moldagem das amostras procurou-se manter um padrão de peso específico para cada solo.

As amostras deformadas foram moldadas por meio de compactação no próprio anel de PVC. Anteriormente à compactação determinou-se a umidade natural do solo e definiu-se a umidade de compactação e o peso específico desejados. Uma porção de solo foi umidificada até atingir a umidade desejada. O solo úmido foi passado na peneira #4. As dimensões dos anéis foram medidas e, com esses dados, calculou-se para cada anel a massa de solo requerida a fim de atingir o peso específico padrão.

A compactação foi realizada com auxílio de soquete pequeno. Foram utilizadas 3 a 4 camadas de solo para compactação nos anéis de 2 cm de altura. Após a compactação os corpos de prova foram envolvidos em filme de PVC para que não houvesse perda de umidade (Figura 3.34). A Tabela 3.20 apresenta as características das amostras utilizadas para ensaios em centrífuga.

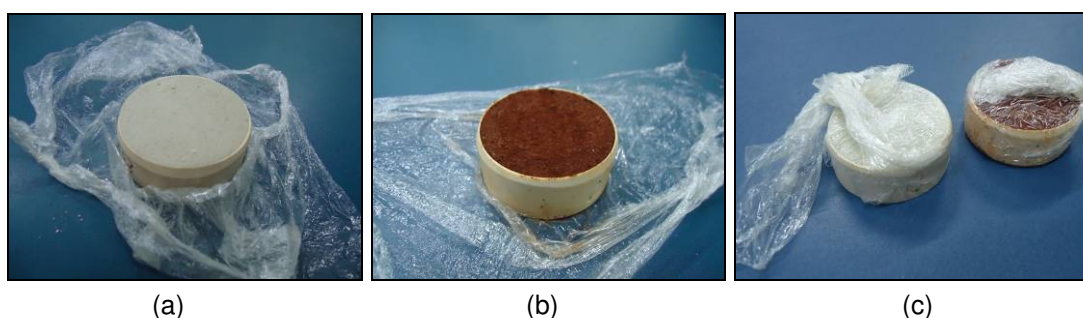


FIGURA 3.34 – AMOSTRAS DOS SOLOS FINOS PARA ENSAIO EM CENTRÍFUGA: (a) SOLO SILTOSO 2; (b) SOLO SILTOSO 1; (c) AMOSTRAS ENVOLVIDAS EM FILME DE PVC.

TABELA 3.20 – CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO EM CENTRÍFUGA.

Amostra	Anel	Solo	Ensaio	Peso específico (kN/m ³)	Umidade	Peso específico seco (kN/m ³)	Índice de vazios	Porosidade
1	18	Silte 1	CRUS	14,07	27,02	11,08	1,50	59,95%
2	39		CRUS	14,22	27,02	11,20	1,47	59,53%
3	26		Função-K e CRUS	14,06	27,02	11,07	1,50	59,98%
4	41		Função-K e CRUS	14,05	27,02	11,06	1,50	60,02%
5	32	Silte 2	CRUS	17,76	30,11	13,65	0,89	47,09%
6	34		CRUS	17,82	30,11	13,69	0,88	46,93%
7	21		Função-K e CRUS	17,87	30,11	13,73	0,88	46,77%
8	25		Função-K e CRUS	17,87	30,11	13,73	0,88	46,77%

Para o procedimento em centrífuga, as amostras foram saturadas anteriormente à colocação nos compartimentos da centrífuga. O procedimento para umedecimento consistiu em colocar a base das amostras em um recipiente com água de forma que haveria fluxo ascendente de entrada de água no solo até atingir um estado encharcado (Figura 3.35). As amostras foram pesadas para verificação do estado de saturação e dispostas na centrífuga. O topo da amostra foi coberto com cap de PVC e tampa de alumínio para evitar a secagem por evaporação durante o ensaio.



FIGURA 3.35 – SATURAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO EM CENTRÍFUGA.

3.2.3 Procedimento de ensaio para CRUS

O ensaio segue uma trajetória de secagem. Assim, as amostras de solos e os discos cerâmicos devem estar saturados. A saturação dos discos cerâmicos é realizada por meio da submersão dos mesmos em água destilada por 48 horas e rotação dos mesmos em centrífuga com velocidade de 500 rpm. Esse procedimento serve para saturação completa dos discos, inibindo a formação de bolhas de ar no seu interior. Para verificação da saturação, os discos cerâmicos foram submergidos em água e a formação de bolhas foi monitorada. Não havendo a formação de bolhas identifica-se a saturação completas dos discos.

Após saturação dos discos, moldagem e umedecimento das amostras (conforme descrito no item anterior), os componentes do aparato experimental foram montados da seguinte forma:

- Os anéis com corpos de prova foram inseridos em um envoltório lateral de PVC com a base coberta por tecido fino com o objetivo de evitar a perda de solo (Figura 3.36).



FIGURA 3.36 – CONJUNTO DE PVC: ANEL COM AMOSTRA DE SOLO, ANEL MAIS ESPESSO COM TECIDO FINO NA BASE E CAP.

- Os discos cerâmicos saturados com diferentes espessuras foram dispostos simetricamente nos recipientes no interior da centrífuga, de forma a evitar desequilíbrios por diferença de peso. Para o ensaio inicial de CRUS foram utilizados os discos cerâmicos com espessura de 13 mm, nos recipientes 1 e 3, e com espessura de 50 mm nos recipientes 2 e 4 (Figura 3.37).



FIGURA 3.37 – DISPOSIÇÃO DOS DISCOS CERÂMICOS NO INTERIOR DOS RECIPIENTES DA CENTRÍFUGA: (a) DISCO DE 50 MM NO RECIPIENTE 2; (b) DISCO DE 13 MM NO RECIPIENTE 1.

- Sobre os discos cerâmicos acrescentou-se papel filtro com as mesmas dimensões (diâmetro) do disco.
- Sobre o papel filtro acrescentou-se o conjunto com amostra de solo, anéis de PVC e base coberta por tecido fino.

- Os recipientes 1 e 2 receberam amostras de solo siltoso 2 e os recipientes 3 e 4, de solo siltoso 1 (Figura 3.38).

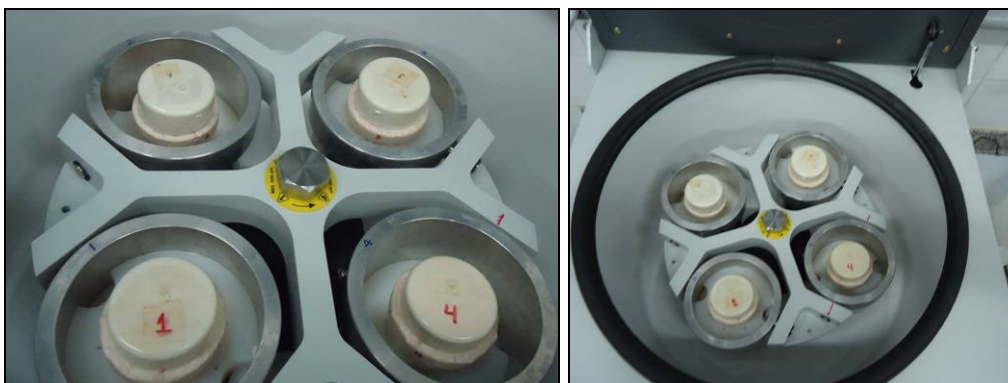


FIGURA 3.38 – RECIPIENTES DA CENTRÍFUGA COM AS QUATRO AMOSTRAS DE SOLO.

- Os recipientes foram fechados com cap de PVC e de alumínio para evitar possíveis perdas por evaporação, visto que o equipamento tende a aquecer com o aumento da aceleração centrípeta.



FIGURA 3.39 – RECIPIENTES DA CENTRÍFUGA FECHADOS COM CAPS DE ALUMÍNIO.

As diferentes alturas dos discos cerâmicos permitem a imposição de diferentes sucções em uma mesma velocidade de rotação, facilitando a obtenção de mais pontos da CRUS com um único ensaio.

Após a devida acomodação dos discos cerâmicos, papel filtro, amostras e tampas de alumínio, a centrífuga é fechada e programada para rotacionar em determinada velocidade por determinado período de tempo.

O ensaio consiste em aplicar diferentes acelerações centrípetas às amostras de solo de forma a induzir diferentes sucções na amostra. A sucção imposta é calculada pela Equação 3.2.

A centrífuga é parada de tempo em tempo para verificação da variação da massa da amostra e, com isso, determinação da massa de água no solo, utilizada para o cálculo da umidade e verificação da condição de equilíbrio em cada estágio de aceleração (ausência de variação no peso das amostras). Os conjuntos (anel de PVC com amostra, anel de PVC externo e cap de PVC) fechados foram pesados em balança com precisão 0,0001 g para obtenção da massa de solo sem que houvesse maiores perdas de água, o que poderia ocorrer pela extração do anel central do conjunto (Figura 3.40).

A condição de equilíbrio (ausência de fluxo) define a condição de parada do ensaio em determinada rotação da centrífuga. Após atingida a condição de equilíbrio, a cada estágio, procede-se ao aumento da velocidade de rotação sucessivamente até o estágio final do ensaio (3000 rpm). Ao final do ensaio as amostra foram pesadas, retiradas dos anéis de PVC e secadas em estufa por um período mínimo de 24 horas para determinação da massa seca e umidade final. As umidade intermediárias foram, então recalculadas para definição da CRUS.



FIGURA 3.40 – PESAGEM DO CONJUNTO DE PVC COM AMOSTRA DE SOLO.

Com o valor de umidade ao final de um estágio de aceleração e o valor de sucção análogo, no centro da amostra, dado pela Equação 3.2, obtém-se a curva de retenção de umidade do solo.

Para ensaio da CRUS o interesse está em determinar a condição final de estabilização da umidade da amostra, após aplicação de certo nível de aceleração, não sendo relevante a variação da massa ou volume ao longo do tempo.

As velocidades de rotação aplicadas foram 300, 500, 1000, 1500 2000, 2500 e 3000 rpm. De forma que em um ensaio obteve-se 14 pontos da curva de retenção para cada solo (sete estágios de velocidade com dois discos cerâmicos diferentes para cada solo).

O estágio de 300 rpm serviu para avaliação inicial da resposta dos solos. Nesse estágio, a rotação foi interrompida de 15 em 15 minutos para monitoramento da massa. Verificou-se com isto que o tempo de estabilização para ambos os solos passava de 90 minutos. Com esta verificação, para os demais estágios a centrífuga foi programada para acelerar continuamente por 90 minutos antes da primeira parada.

Para determinação da CRUS, cada estágio de aceleração levou 120 minutos, com exceção dos dois primeiros, de 300 e 500 rpm (194 e 135 minutos, respectivamente). Considerando os sete estágios de aceleração aplicados, o ensaio completo para determinação da curva de retenção de umidade de dois solos foi realizado em cerca de 16 horas, com 27 paradas da centrífuga.

O ensaio pode ser feito em mais de um solo concomitantemente, no entanto, o tempo final do ensaio pode variar de um solo para outro. Assim, não seria recomendada a realização de ensaios simultâneos para dois solos com comportamentos muito diferentes.

3.2.4 Procedimento de ensaio para Função-K

O procedimento para determinação da Função-K segue as mesmas etapas que o ensaio de curva de retenção: as amostras devem ser inicialmente saturadas e dispostas na centrífuga sobre discos cerâmicos de diferentes espessuras, simetricamente ajustados aos recipientes da centrífuga; diferentes

estágios de aceleração centrípeta são impostos às amostras de forma a aplicar diferentes sucções a estas. A diferença entre os procedimentos para CRUS e para Função-K está associada à necessidade de conhecimento da variação da massa ou volume de água no solo ao longo do tempo para obtenção da condutividade hidráulica. Para suprir essa necessidade, no ensaio de Função-K, devem ser programadas mais paradas da centrífuga para monitoramento da massa da amostra.

A condutividade não saturada é determinada considerando a validade da lei de Darcy em ambiente com gravidade induzida, sendo dada pela seguinte equação:

$$K(\psi) = - \frac{\rho_w g \overline{v_m}}{\left[\frac{\partial \psi_m}{\partial z_m} - \rho_w \omega^2 r_1 \right]} \quad (3.3)$$

Onde $K(\psi)$ é a condutividade hidráulica não saturada, $\overline{v_m}$ é a velocidade de descarga de água média, $\frac{\partial \psi_m}{\partial z_m}$ é o gradiente de sucção médio ao longo da amostra, ω é a velocidade angular de rotação da centrífuga em rad/s e r_1 é a distância do eixo de rotação da centrífuga ao centro da amostra de solo.

A velocidade de descarga média é determinada considerando a variação do volume de água no solo ao longo do tempo e a área da amostra, conforme a seguinte formulação:

$$\overline{v_m} = \frac{\Delta V}{A \cdot t_{\text{médio}}} \quad (3.4)$$

A variação de volume é obtida com base na variação da massa do solo. A variação de massa ocorre devido à saída de água do solo. Assim, pesando a amostra obtém-se a massa do solo, da qual se subtrai a massa seca para obter-se o valor da massa de água no interior do solo naquele instante. A massa de água é convertida em volume com base na densidade do líquido (1

g/cm³). Dessa forma, a cada parada da centrífuga determina-se o volume de água no solo em determinado tempo. Com paradas sucessivas é possível plotar um gráfico de volume *versus* tempo e definir o tempo médio para equilíbrio ($t_{\text{médio}}$).

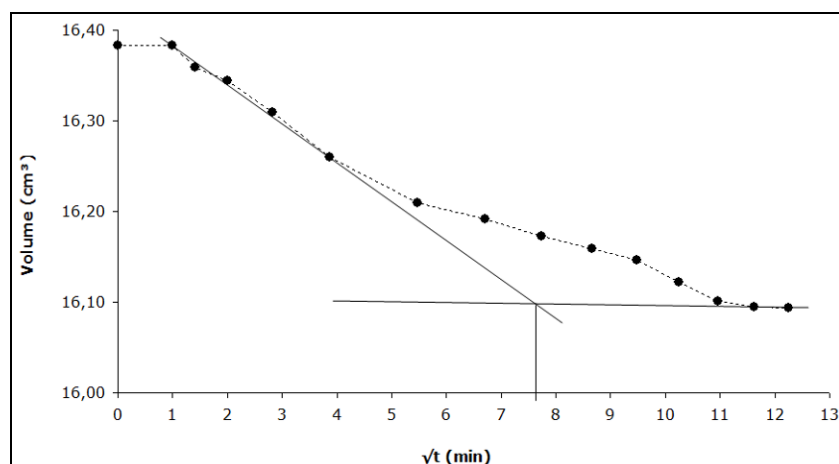
Para análise do tempo médio foram plotados gráficos de volume de água no solo em função da raiz quadrada do tempo, conforme metodologia proposta por Smith (1967) e utilizada por Sterck (2011).

A metodologia de Smith (1967) baseia-se na determinação do tempo médio de ensaio, através da plotagem de um gráfico de volume em relação à raiz quadrada do tempo e definição do ponto de interseção da tangente da porção inicial da curva com a tangente da porção final (que tende a uma assíntota horizontal), cuja abscissa corresponde à raiz quadrada do tempo médio utilizado na Equação 3.4. No entanto, alguns gráficos obtidos através dessa metodologia não apresentaram assíntota horizontal bem definida, fato que levou à necessidade de verificação do tempo de equilíbrio através do gráfico em função do tempo apenas. Nesses gráficos ($V \times t$), definiu-se como tempo médio a abscissa do ponto de interseção entre uma reta tangente ao ponto de menor curvatura e uma reta tangente à porção final que, nesse caso, se aproximava mais de assíntota horizontal.

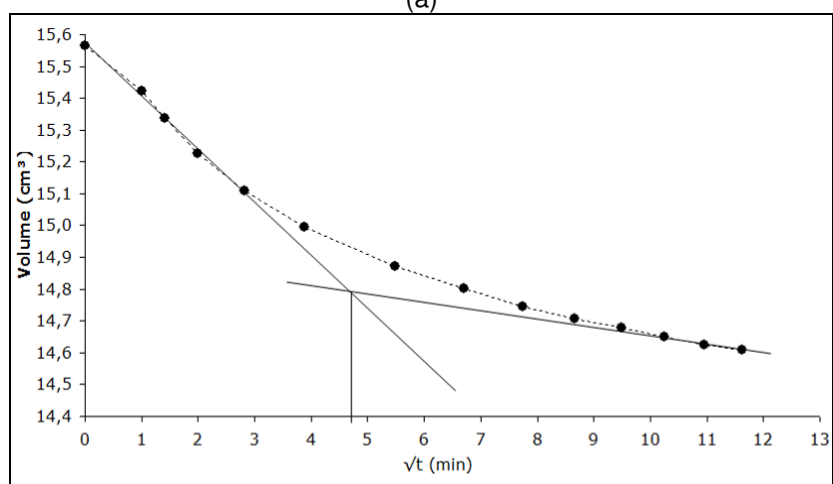
A Figura 3.41 apresenta exemplos de curva da variação do volume de água no solo em relação ao tempo e à raiz quadrada do tempo, bem como as tangentes traçadas para obtenção do tempo médio.

No Capítulo 4 é apresentada a comparação entre os valores obtidos através de cada método gráfico, bem como uma discussão sobre como estes valores influenciaram nos resultados finais de condutividade hidráulica não saturada.

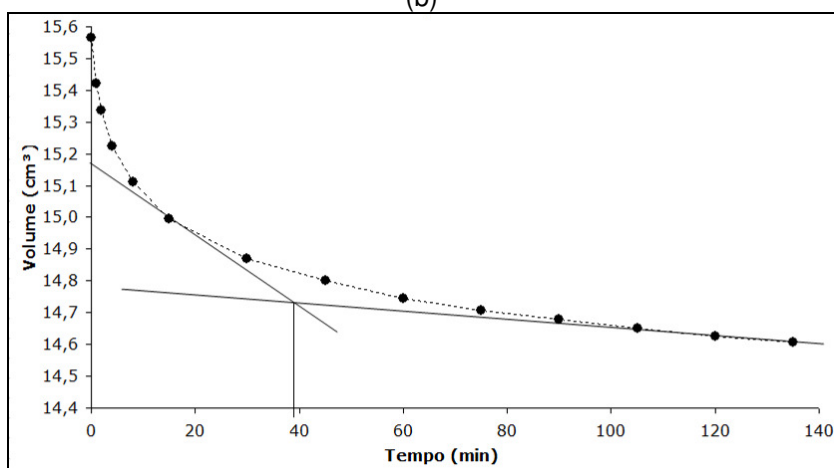
Para obtenção de pontos de $V \times \sqrt{t}$, devidamente distribuídos no gráfico, foram programadas paradas sucessivas nos seguintes tempos de ensaio: 1, 2, 4, 8, 15, 30, 45 minutos e sucessivamente de 15 em 15 minutos até detecção da condição de equilíbrio.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 3.41 – EXEMPLOS DE CURVA DE VOLUME DA ÁGUA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA ENSAIO EM CENTRÍFUGA: (a) ASSÍNTOTA HORIZONTAL BEM DEFINIDA EM GRÁFICO $V \times \sqrt{t}$; (b) ASSÍNTOTA HORIZONTAL NÃO DEFINIDA EM GRÁFICO $V \times \sqrt{t}$; (c) ANÁLISE ATRAVÉS DO GRÁFICO $V \times t$ PARA MESMA CONDIÇÃO DE (b).

Sterck (2011) realizou ensaios de Função-K na mesma centrífuga, utilizando discos cerâmicos de 12 mm e 63 mm de espessura, e verificou que o

período de tempo mínimo necessário para se definir a condição de equilíbrio relacionado às amostras sobre discos cerâmicos de menor espessura é bem menor do que para amostras sobre discos de espessura superior. O autor associou essa característica às diferentes magnitudes de sucção, induzidas pelos discos cerâmicos de diferentes alturas, e aos diferentes níveis de gravidade em cada caso, sendo os níveis mais altos para os discos menos espessos e tendendo, teoricamente, a uma estabilização mais rápida. Dessa forma, conclui-se que para obtenção da condição de equilíbrio em menor período de tempo devem ser utilizados discos cerâmicos menores. Com base nessa conclusão, para o presente estudo foram utilizados discos de 13 mm e de 24 mm de altura para o ensaio de Função-K.

Para estimativa da condutividade hidráulica não saturada, conforme Equação 3.3, é também necessário determinar o gradiente de sucção para cada estágio de ensaio. O gradiente de sucção médio é dado pela média entre o gradiente de sucção no início do estágio de aceleração (gradiente final do estágio anterior) e no final do mesmo:

$$\overline{\frac{\partial \psi}{\partial z}} = \frac{\left(\left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_{\text{início}} + \left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_{\text{final}} \right)}{2} \quad (3.5)$$

Em cada estágio o gradiente é calculado considerando a altura da amostra e a sucção imposta no topo e na base:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\psi_{\text{topo}} - \psi_{\text{base}}}{\Delta z} \quad (3.6)$$

Para determinação da Função-K através dessa metodologia devem ser levados em conta os valores médios de sucção entre estágios, visto que essa formulação, proposta por Gardner (1937), é válida apenas para a estimativa da sucção sob condição sem fluxo. Para validade da estimativa de sucção em ambiente com gravidade induzida são considerados passos de fluxo transiente a cada parada da centrífuga. A utilização da Equação 3.2 segue a hipótese de que durante o fluxo transiente a magnitude da sucção em determinado ponto

irá mudar gradualmente, de forma que a condutividade hidráulica estimada denotará a condutividade hidráulica não saturada média desenvolvida na amostra de solo durante todo o processo transiente. O gradiente de sucção deve ser calculado em torno da altura média da amostra de solo, considerando as respectivas sucções médias estimadas ao final de dois estágios sucessivos. Em vista do comprimento reduzido da amostra, apenas 2 cm, o gradiente de sucção não é afetado pela variação dos pontos utilizados para sua determinação, conforme pode ser verificado pelo gráfico da Figura 3.42, que indica o gradiente de sucção calculado considerando a diferença de sucção entre topo e base e entre dois pontos distantes 0,5 e 0,1 cm da altura média da amostra.

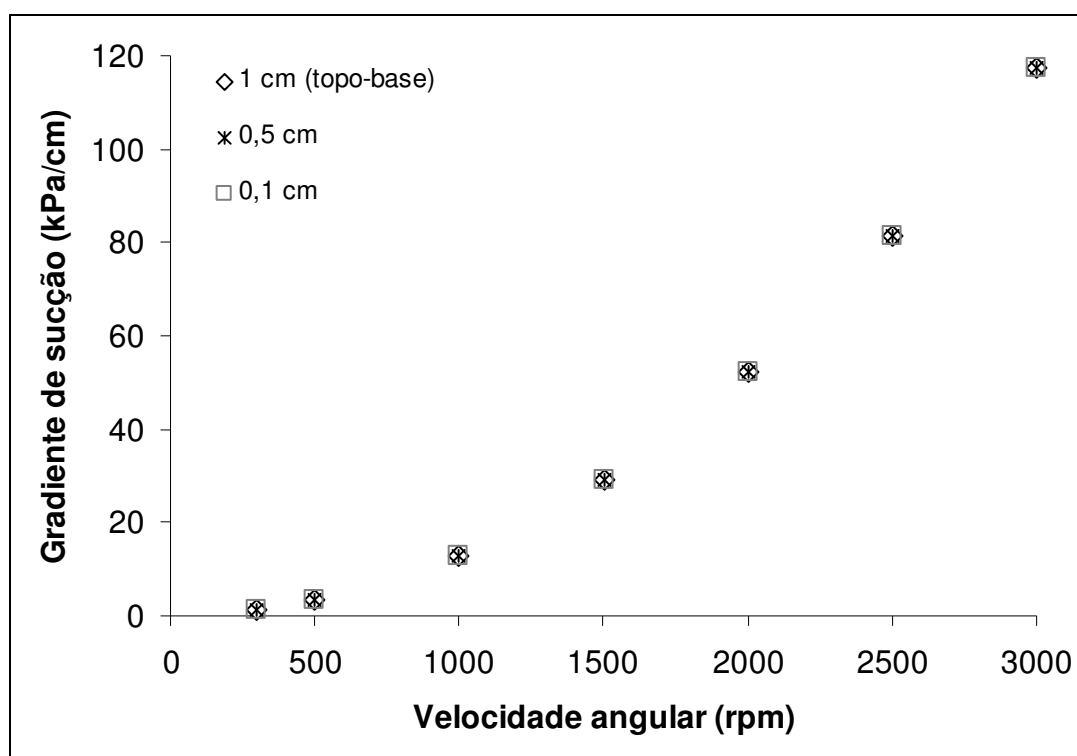


FIGURA 3.42 – VARIAÇÃO DO GRADIENTE DE SUCÇÃO COM A VELOCIDADE ANGULAR E COM A REGIÃO DA AMOSTRA (A LEGENDA INDICA A DISTÂNCIA EM RELAÇÃO AO CENTRO DA AMOSTRA A PARTIR DA QUAL FOI CALCULADO O GRADIENTE DE SUCÇÃO).

Portanto, a metodologia utilizada permite a estimativa da Função-K através de fluxos transientes sucessivos, sem a desvantagem de determinação de uma região da amostra de solo com gradiente hidráulico unitário.

A estimativa da condutividade hidráulica não saturada é efetuada a cada estágio de aceleração, após a condição de equilíbrio (ausência de variação na massa de água). O tempo mínimo necessário para chegada à condição de equilíbrio deve variar para cada altura de disco cerâmico utilizado e também para cada solo. Considerando que no presente estudo foram realizados ensaios simultâneos com dois tipos de disco cerâmico e dois tipos de solo, o tempo final para cada estágio de aceleração foi determinado apenas quando todos os gráficos de $V \times \sqrt{t}$ apresentaram a condição de equilíbrio (tendência para uma assíntota horizontal).

A sucção associada ao valor de condutividade hidráulica não saturada determinada pela Equação 3.3 será a sucção média ao longo de dois ensaios sucessivos:

$$\psi_{média} = \frac{\psi_{final} + \psi_{início}}{2} \quad (3.7)$$

Os ensaios para CRUS e para Função-K podem ser realizados concomitantemente, bastando para isso que sejam efetuadas as paradas nos períodos de tempo indicados para avaliação da variação da massa de água, possibilitando a determinação do tempo médio de ensaio. Assim, sempre que for feito ensaio da Função-K serão também obtidos os conjuntos de valores de umidade e sucção necessários para determinação da curva de retenção de umidade.

Para determinação da Função-K também foram utilizados sete estágios de aceleração (300, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 e 3000 rpm). Cada estágio de aceleração levou, em média, 140 minutos. Foram efetuadas um total de 56 paradas da centrífuga para pesagem das amostras, cada parada levou, em média, 2 minutos, de forma que o ensaio completo durou pouco mais de 18 horas.

3.3 DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO-K COM APLICAÇÃO DE PRESSÃO DE AR EM PERMEÂMETRO

3.3.1 Descrição do permeâmetro

O equipamento projetado por Dell'Avanzi (2004) consiste em um permeâmetro de fluxo permanente para uso em centrífuga.

Esse equipamento propicia o controle das condições de contorno inferior e superior e, além disso, permite a instalação de instrumentação capaz de medir o conteúdo de água do solo ou sua sucção. A configuração geral do permeâmetro, da forma como foi utilizado para o presente estudo, é indicada na Figura 3.43.

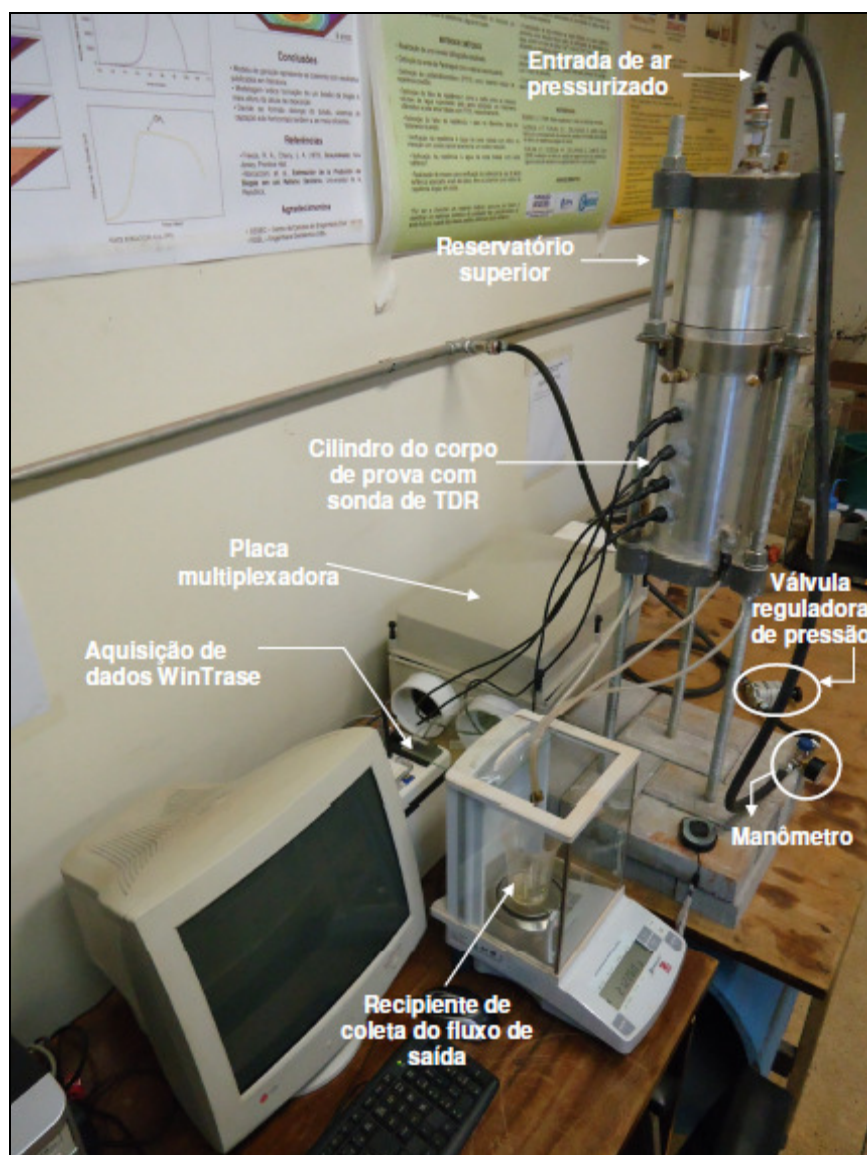


FIGURA 3.43 – CONFIGURAÇÃO GERAL DO PERMEÂMETRO.

O permeâmetro possui três componentes principais:

- sistema de controle de descarga;
- cilindro de parede rígida onde será disposto o corpo de prova do solo, e
- reservatório inferior de coleta de água.

O permeâmetro foi utilizado em configuração para análise transiente da Função-K, conforme Figura 3.44. Para ensaios sob regime de fluxo transiente a porção do permeâmetro acima da amostra de solo fica ligada à linha de ar pressurizado e mede-se, na base, a velocidade de fluxo de saída e, ao longo da coluna de solo, os perfis instantâneos de umidade através de sondas de TDR.

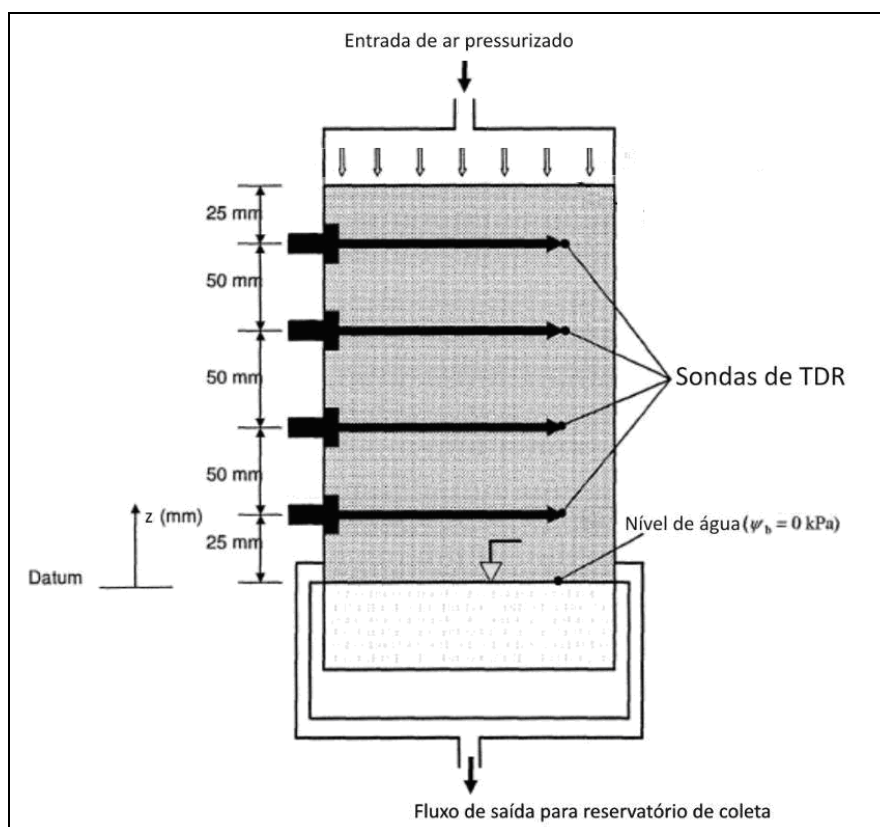


FIGURA 3.44 – CONFIGURAÇÃO DO PERMEÂMETRO COM PRESSURIZAÇÃO NO TOPO DO SOLO, ENSAIO TRANSIENTE.

Fonte: Adaptado de Dell'Avanzi (2004).

Para realização de ensaios de condutividade hidráulica não saturada serão consideradas as condições de contorno: inferior, imposição de

determinado valor de sucção (0 kPa), na base do permeâmetro ($z = 0$), e superior, aplicação de pressão de ar no topo da amostra ($z = L$).

A utilização de pressurização diretamente no topo da camada de solo, ao invés de abertura para atmosfera e utilização de placa cerâmica para imposição de velocidade de fluxo conhecida no topo do solo, configura-se em uma modificação da estrutura original proposta por Dell'Avanzi (2004). Optou-se pela utilização dessa nova configuração de ensaio em regime transiente a fim de acelerar o período de tempo para obtenção da Função-K, visto que na configuração criada por Dell'Avanzi os ensaios eram realizados em centrífuga e no presente estudo foram realizados em gravidade normal apenas com aplicação da pressão de ar.

3.3.1.1 Sistema de pressurização de ar

O primeiro componente do permeâmetro consiste no sistema de recebimento de ar pressurizado localizado acima do cilindro do corpo de prova (Figura 3.45).



FIGURA 3.45 – PORÇÃO SUPERIOR DO PERMEÂMETRO COM CONEXÃO A LINHA DE AR PRESSURIZADO.

O equipamento permite várias configurações para este sistema, podendo ser utilizadas placas cerâmicas acima da coluna de solo para segregar o compartimento em diferentes reservatórios de água, permitindo a aplicação e o controle da velocidade de descarga de água para a coluna de solo, conforme Figura 3.46.

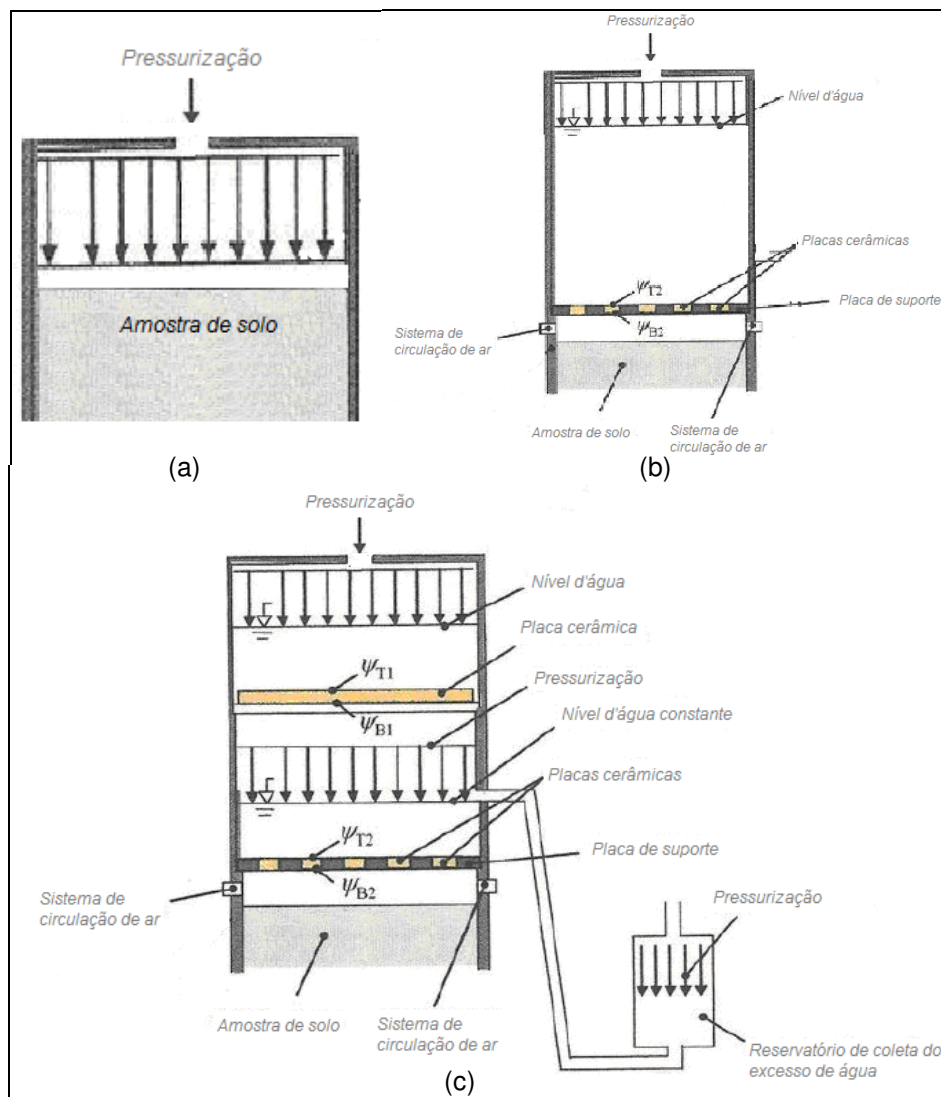


FIGURA 3.46 – DIFERENTES CONFIGURAÇÕES PARA O SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE DE DESCARGA: (a) SEM PLACA CERÂMICA (UTILIZADO NO PRESENTE ESTUDO); (b) COM UMA PLACA CERÂMICA - UM RESERVATÓRIO, (c) COM DUAS PLACAS CERÂMICAS - DOIS RESERVATÓRIOS.

Fonte: Adaptado de Dell'Avanzi (2004).

A primeira configuração consiste na entrada de ar pressurizado, a qual tem contato direto com a coluna de solo. A segunda configuração é composta por apenas um reservatório de água pressurizado, acoplado internamente ao cilindro rígido, com um disco cerâmico na base. A terceira configuração é composta por dois reservatórios superpostos, sendo o superior responsável pelo fornecimento de água ao inferior, este último com função de manutenção do nível constante, para garantir uma velocidade de descarga constante ao corpo de prova. Em todos os casos os reservatórios são pressurizados.

As duas últimas configurações permitem a distribuição homogênea do fluxo de água no solo e o controle da velocidade de descarga de água para o interior da amostra de solo, condição de contorno superior essencial quando se estiver interessado na realização de ensaio permanente. Como neste estudo optou-se pela análise da permeabilidade em estado transiente, em função do menor período de tempo requerido, utilizou-se a configuração da porção superior sem placas cerâmicas, mantendo a pressão de ar diretamente sobre a coluna de solo. Portanto, no caso do ensaio em regime transiente a condição de contorno superior passa a ser apenas a imposição de pressão de ar.

A amostra inicialmente saturada apresenta diferentes comportamentos com o aumento da pressão aplicada no topo. O fluxo dirigido pelas forças gravitacional e de pressão impõe diferentes perfis de umidade/sucção ao solo e diferentes velocidades de fluxo de saída, as quais são avaliadas para determinação da condutividade hidráulica em cada estágio de pressão.

A pressão de ar é aplicada ao compartimento superior através de uma linha de ar pressurizada por um compressor de pistão da marca Schulz, modelo MSI 5,2ML, com pressão máxima de 120 psi, o que equivale a 827 kPa (Figura 3.47).



FIGURA 3.47 – COMPRESSOR.

Quanto à instrumentação de monitoramento e controle da pressão de ar aplicada, foram utilizados dois manômetros, um da marca Arprex (modelo RF1, com intervalo de medição de 0 a 1103 kPa e precisão de ± 17 kPa) e outro da

marca WIKA (com intervalo de medição de 0 a 392,4 kPa e precisão de $\pm 9,8$ kPa) e duas válvulas Bellofram, modelo *Precision Pressure Regulator Type 10*, com intervalo de controle de 2 a 120 psi (aproximadamente 14 a 827 kPa) (Figura 3.48).



FIGURA 3.48 – MANÔMETROS E VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO (BELLOFRAM).

Um par válvula-manômetro foi conectado, nessa ordem, à mangueira que leva ar comprimido até cada componente pressurizado do permeâmetro (compartimento superior, e reservatório inferior – com pressurização apenas para saturação da amostra).

As válvulas são responsáveis pelo controle da pressão que será fornecida ao permeâmetro, os manômetros devem vir após estas para indicar qual a pressão que efetivamente chega ao equipamento. O uso das válvulas Bellofram é essencial, pois estas permitem melhor ajuste da pressão, com tempo de resposta mais curto do que a regulação apenas através dos manômetros.

3.3.1.2 Cilindro do corpo de prova

O recipiente onde foi disposto o corpo de prova (Figura 3.49) consiste em um cilindro de alumínio vertical com 15 cm de diâmetro externo, 1,25 a 2,0 cm de espessura e 33 cm de altura. Esse componente possui vários pontos de entrada ao longo de sua altura, permitindo a instalação de instrumentação para determinação do perfil de umidade.

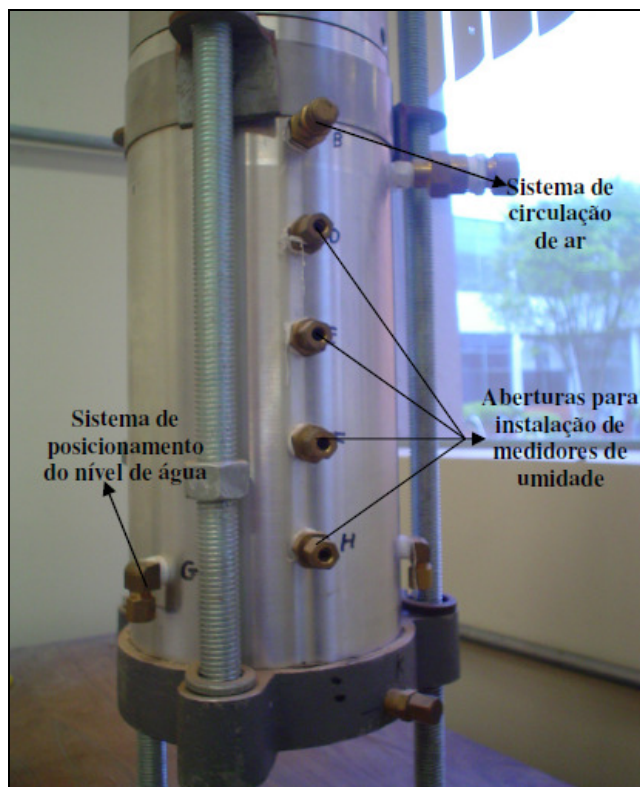


FIGURA 3.49 – CILINDRO DO CORPO DE PROVA.

A parte superior do cilindro possui duas aberturas que conectam o permeâmetro a um sistema de circulação de ar, permitindo a saída de ar durante a entrada de água. No caso da configuração para ensaio transiente, essas aberturas permaneceram fechadas a fim de não permitir o fluxo de ar.

A parte inferior do cilindro possui três aberturas localizadas na mesma altura (5 cm a partir da base do cilindro) e igualmente espaçadas entre si, que têm como função manter a condição de contorno inferior ($\psi = 0$ kPa), garantindo constante saturação até a cota $z=0$ (5 cm a partir da base do cilindro) por meio da liberação do excedente de água para o reservatório de coleta inferior.

O corpo de prova de solo colocado no interior do permeâmetro pode ter de 25 cm a 28 cm de altura. Entre o topo do solo e o compartimento superior podem ser instaladas placas cerâmicas para controle de velocidade de descarga, caso haja interesse em proceder ao ensaio com fluxo permanente. Nesse caso, entre a placa e o topo da amostra de solo deve haver espaço vazio para garantir a mobilidade do ar, procedimento necessário para validade da equação de Richards (Dell'Avanzi, 2004). Ressalta-se que esta

configuração não foi utilizada no presente estudo, em vista do interesse na análise do estado transiente, mas julgou-se importante mencionar as diversas possibilidades de utilização do equipamento.

O cilindro possui mais quatro aberturas dispostas verticalmente ao longo de sua altura, sendo a primeira localizada na cota $z=2,5\text{ cm}$, e as seguintes a cada 5 cm de distância em relação à anterior. São estas aberturas que possibilitam a instalação da instrumentação para medir a umidade em diferentes pontos da amostra de solo.

A instrumentação utilizada consistiu em sensores de TDR (*Mini Trase System*) da *Soilmoisture Incorporated*, cujo princípio de funcionamento foi descritos na revisão bibliográfica (item 2.1.4.1).

Como o princípio de funcionamento dos sensores de TDR se baseia na resistência elétrica do solo, que é influenciada pela salinidade da água, foi utilizada água destilada como líquido permeante para evitar possíveis erros na medida do perfil de umidade.

3.3.1.3 Reservatório inferior

O terceiro componente, reservatório inferior, fica posicionado abaixo do cilindro de alumínio. Este componente tem duas funções: permitir a pressurização de água para saturação do solo por fluxo ascendente e coletar toda a água proveniente do fluxo de saída, através das três aberturas na parte inferior do permeâmetro (que compõem o sistema de manutenção do nível de água na base do permeâmetro). Essas aberturas são conectadas ao reservatório de coleta por meio de três tubos. Inicialmente foram utilizados tubos de cobre, os quais posteriormente foram substituídos por mangueiras finas de plástico para maior mobilidade do conjunto.

Para exercer cada uma das funções citadas foram utilizados diferentes compartimentos. Para saturação da amostra acoplou-se como reservatório inferior um cilindro de alumínio fechado com entrada para ar pressurizado na base e conexão às três aberturas do permeâmetro no topo (Figura 3.50). Para recebimento do fluxo de saída durante o ensaio propriamente dito utilizou-se como reservatório de coleta um recipiente plástico leve (Figura 3.51).



FIGURA 3.50 – RESERVATÓRIO INFERIOR DE ALUMÍNIO FECHADO UTILIZADO PARA APLICAÇÃO DE PRESSÃO PARA SATURAÇÃO DA AMOSTRA.

Como pode ser visualizado na Figura 3.50, o reservatório inferior para saturação da amostra consiste, basicamente, em um cilindro pequeno de alumínio, no qual foram abertas duas entradas superiores (uma conectada às três aberturas da base do cilindro do corpo de prova e outra para possibilitar a colocação de água no reservatório) e uma entrada inferior, para recebimento de ar pressurizado.

Na configuração para ensaio transiente, esse reservatório inferior é utilizado apenas para saturação do solo com pressurização da base. Após a saturação, as conexões são retiradas e os três tubos ligados às aberturas da base do permeâmetro são conectados a um recipiente plástico leve levado à balança para determinação da variação da massa de água que sai do solo ao longo do tempo.

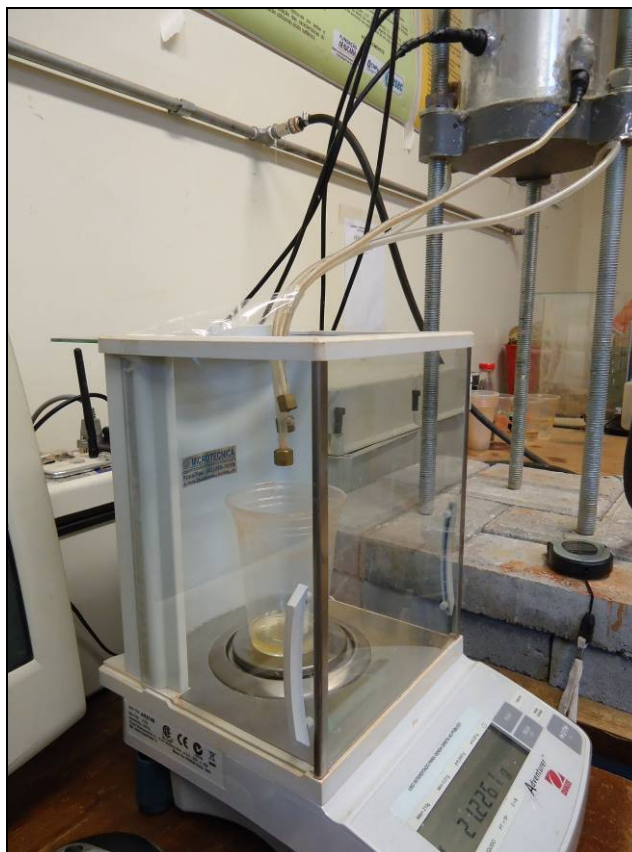


FIGURA 3.51 – CONFIGURAÇÃO DO RESERVATÓRIO INFERIOR PARA COLETA DE ÁGUA.

O reservatório de alumínio permite a conexão de um transdutor de pressão a sua base, o que permitiria leituras mais precisas do fluxo de água de saída do solo. Em vista da impossibilidade de aquisição de tal equipamento, no presente estudo utilizou-se um método mais simples de determinação do fluxo de saída, consistindo apenas na conexão das saídas de água a uma balança, com precisão de 0,0001g, permitindo medidas acuradas, sem a necessidade de utilização de equipamento de aquisição remota de dados ligados a programas computacionais, o que encareceria os ensaios.

3.3.1.4 Sensores de TDR

Os sensores de TDR (*time domain reflectometry*) são dispositivos utilizados para determinação da sucção ou umidade do solo com que estão em contato. A variável, sucção ou umidade, a ser determinada irá depender do procedimento de calibração realizado, que pode relacionar a leitura dos aparelhos a uma destas duas variáveis. No presente estudo, para os três solos

analisados, foram utilizadas as curvas de calibração de leitura do TDR em relação à umidade do solo.

O sistema de reflectometria no domínio do tempo utilizado foi o Mini Trase System desenvolvido pela *Soilmoisture Incorporated*. O sistema inclui uma placa multiplexadora (Figura 3.53) e um software especialmente desenvolvido para análise de umidade através de ondas de TDR, o WINTRASE, versão 2.07.

Neste estudo foram utilizadas sondas em miniatura, com três hastes paralelas de 80 mm, também confeccionadas pela *Soilmoisture* (Figura 3.52).



FIGURA 3.52 – SONDA DE TDR.



FIGURA 3.53 – PLACA MULTIPLEXADORA E MINITRASE CONECTADOS ÀS SONDAS DE TDR PARA OBTENÇÃO DAS LEITURAS.

As quatro sondas de TDR utilizadas foram dispostas horizontalmente em diferentes alturas na coluna de solo, conforme indicado na Figura 3.54.



FIGURA 3.54 – SONDAS DE TDR DISPOSTA AO LONGO DA COLUNA DE SOLO E VEDADAS COM COLA DE SILICONE E FITA ADESIVA IMPERMEABILIZANTE.

Para relacionar a resposta do equipamento à umidade volumétrica do solo é necessário fazer a calibração para o tipo de solo utilizado. Este procedimento de calibração foi realizado baseado no procedimento descrito por Dell'Avanzi (2004), consistindo nas seguintes etapas:

- Umedecimento e homogeneização da amostra de solo;
- Compactação da amostra no cilindro de Proctor Normal;
- Pesagem do cilindro com o solo compactado para determinação do peso específico total;
- Inserção do sensor de TDR na amostra;
- Envio de 10 sinais e leitura dos valores de k_a associados;
- Retirada de amostras da proximidade da linha central do sensor para determinação da umidade gravimétrica;
- Cálculo da umidade volumétrica através da relação: $\theta = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} w$
- Correlação do valor da umidade volumétrica com o valor da constante dielétrica média das 10 medidas.

A calibração foi realizada em um cilindro de compactação de Proctor Normal (Figura 3.55), de modo que, para a sonda utilizada, não houve a

interferência das bordas do sistema na resposta do sinal enviado, conforme recomendação de Suwansawat e Benson (1999).



FIGURA 3.55 – PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DAS SONDAS DE TDR.

As curvas de calibração obtidas são apresentadas nos gráficos a seguir para umidade gravimétrica e volumétrica.

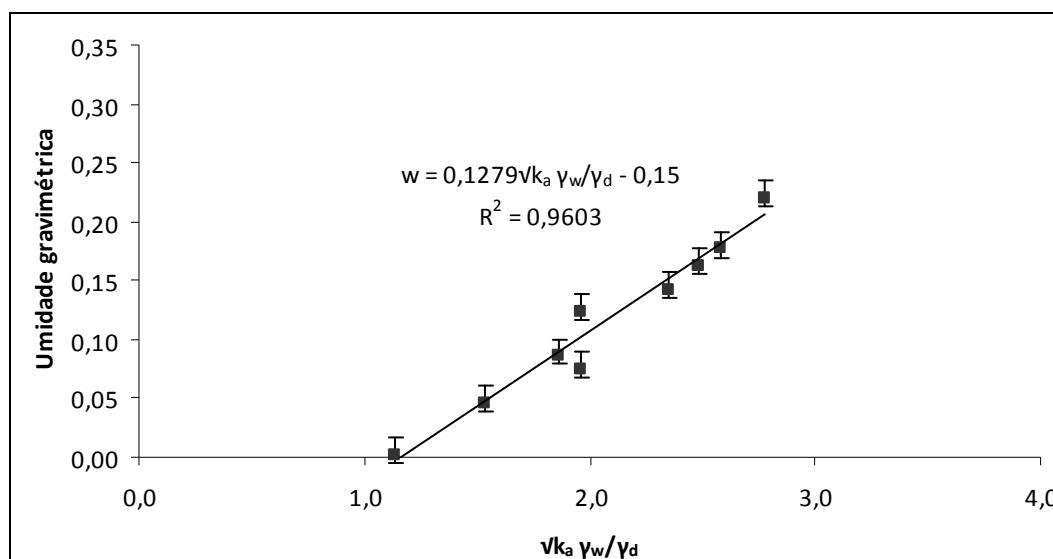


FIGURA 3.56 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TDR PARA UMIDADE GRAVIMÉTRICA PARA AREIA DE PARANAGUÁ.

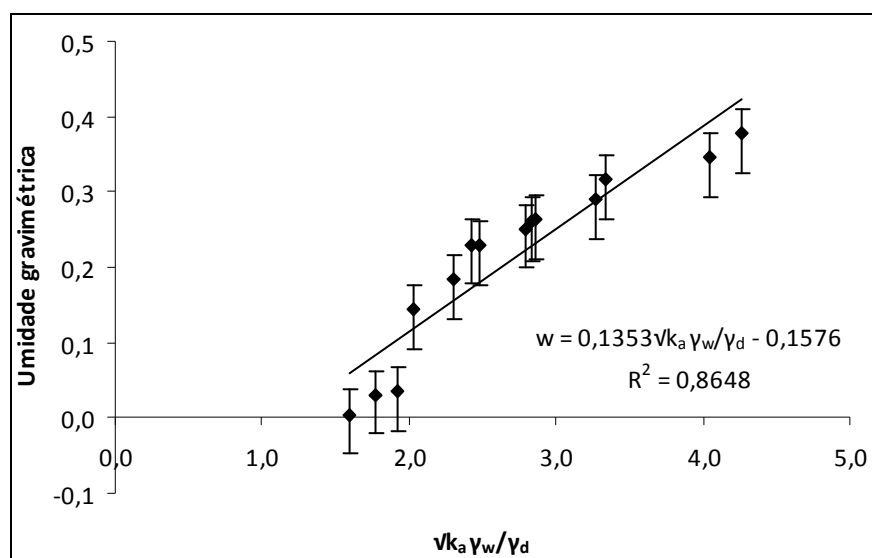


FIGURA 3.57 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TDR PARA UMIDADE GRAVIMÉTRICA PARA SILTE 1.

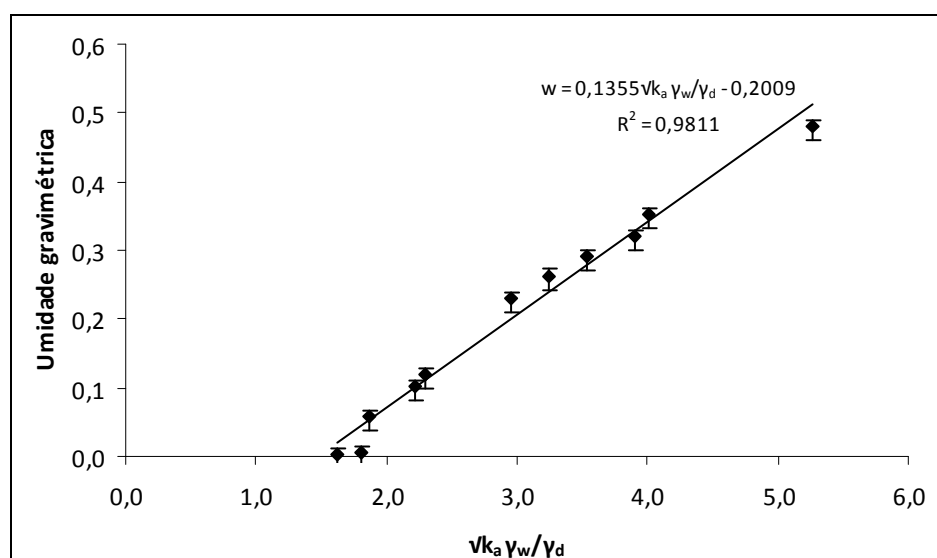


FIGURA 3.58 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TDR PARA UMIDADE GRAVIMÉTRICA PARA SILTE 2.

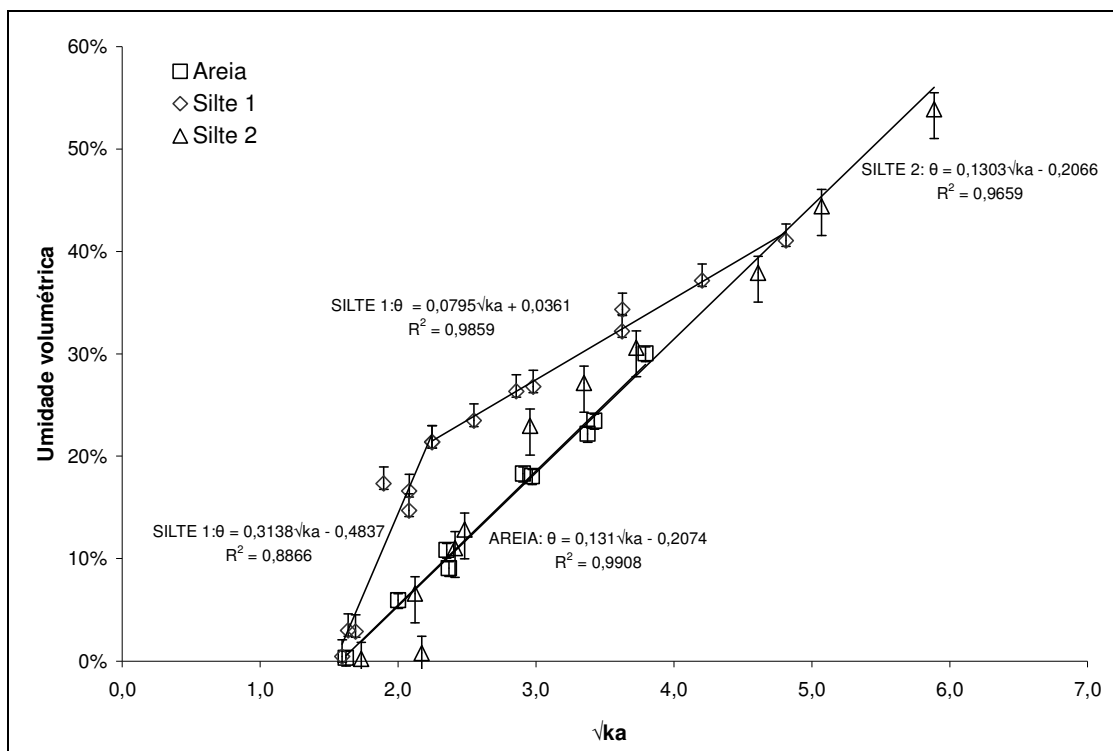


FIGURA 3.59 – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO TDR PARA UMIDADE VOLUMÉTRICA.

TABELA 3.21 – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO TDR PARA OS TRÊS SOLOS UTILIZADOS.

Solo	Curvas de calibração	
	Umidade gravimétrica	Umidade volumétrica
Areia	$w = 0,1279\sqrt{ka}\gamma_w/\gamma_d - 0,15$ (3.8) $R^2 = 0,9603$	$\theta = 0,131\sqrt{ka} - 0,2074$ (3.9) $R^2 = 0,9908$
Silte 1	$w = 0,1353\sqrt{ka}\gamma_w/\gamma_d - 0,1576$ (3.10) $R^2 = 0,8648$	$\theta = 0,3138\sqrt{ka} - 0,4837$ ($\sqrt{ka} \leq 2,25$) (3.11) $R^2 = 0,8866$ $\theta = 0,0795\sqrt{ka} + 0,0361$ ($\sqrt{ka} \geq 2,25$) (3.12) $R^2 = 0,9859$
Silte 2	$w = 0,1355\sqrt{ka}\gamma_w/\gamma_d - 0,2009$ (3.13) $R^2 = 0,9811$	$\theta = 0,1303\sqrt{ka} - 0,2066$ (3.14) $R^2 = 0,9659$

3.3.2 Moldagem do corpo de prova

A moldagem do corpo de prova foi realizada de duas maneiras distintas levando em conta os tipos de solos avaliados. Para o solo grosso utilizou-se o método da chuva de areia. Para os solos finos utilizou-se a compactação, calculando previamente a massa de solo a ser inserida na coluna do permeâmetro a fim de obter peso específico semelhante ao das amostras moldadas para ensaio em centrífuga.

Pela dificuldade em pesar o equipamento inteiro, a massa de solo inserida na coluna do permeâmetro foi medida considerando a pesagem inicial de certa quantidade de solo (estimada como necessária para o preenchimento da coluna até a altura desejada, entre 25 cm e 28 cm) e da massa remanescente, que restou após o processo de moldagem.

O volume do corpo de prova foi calculado com base nas dimensões internas do permeâmetro e na altura da coluna de solo, verificada após a moldagem. Para maior precisão dos resultados, as dimensões da porção das sondas de TDR que permanecem internamente ao permeâmetro foram medidas e subtraídas do volume total da parte interna do permeâmetro.

Na medida em que o permeâmetro era preenchido com solo, as sondas de TDR foram sendo instaladas através das aberturas laterais em uma posição horizontal e seladas com cola de silicone. Aproximadamente na altura de instalação de cada sonda foram retiradas amostras para a determinação da umidade do solo em estufa.

Após a moldagem e secagem da cola de silicone (por um período de 24 horas), obteve-se a primeira leitura das sondas de TDR para comparação com os valores de umidade obtidos com base nas amostras de solo coletadas durante o processo de moldagem. Para reforçar a vedação do equipamento, a porção externa das sondas de TDR foi também vedada com fita adesiva impermeabilizante.

A porção superior do permeâmetro, relativa ao sistema de pressurização de ar, foi conectada ao cilindro do corpo de prova utilizando anel o-ring para melhor vedação. A vedação final do conjunto foi efetuada através do fechamento da porção superior com a tampa com entrada para ar pressurizado e rosqueamento das porcas inseridas nas barras rosqueadas laterais, que mantém a conexão do conjunto.

3.3.2.1 Areia

Para moldagem do solo arenoso foi empregada chuva de areia. O método, proposto originalmente por Presti *et al.* (1992), consistiu na indução de uma chuva de areia uniforme sob vazão e altura de quedas controladas.

A coluna de solo foi moldada no cilindro do permeâmetro com as mesmas características da amostra para ensaio de coluna drenante, chuva de areia com altura de queda constante de 80 centímetros levando a uma densidade relativa de aproximadamente 75%, e índice de vazios inicial de 0,801.

Para o caso da areia, como o processo de moldagem do solo permitia, as sondas de TDR foram instaladas e seladas com cola de silicone anteriormente à colocação do solo no cilindro. Após secagem da cola de silicone pelo período de 24 horas, procedeu-se à chuva de areia nas condições indicadas anteriormente.

3.3.2.2 Solos finos

Os solos finos foram moldados por meio de compactação diretamente no interior do cilindro do permeâmetro. A compactação foi feita em camadas de 300 a 1000 g de solo com auxílio de um soquete pequeno e manualmente nas regiões adjacentes e imediatamente acima das sondas de TDR, a fim de evitar danificação do equipamento.

As Tabelas 3.22 e 3.23 apresentam as características das amostras de solos finos utilizadas para ensaio em permeâmetro.

TABELA 3.22 – CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS DE SOLO SILTOSO 1 PARA ENSAIO EM PERMEÂMETRO.

Amostra	Peso específico (kN/m³)	Umidade gravimétrica inicial (%)	Peso específico seco (kN/m³)	Índice de vazios	Porosidade (%)
1	16,27	37,1	11,87	1,33	57,1
2	13,71	28,1	10,70	1,58	61,3
3	14,87	29,6	11,48	1,41	58,5

TABELA 3.23 – CARACTERÍSTICAS DA AMOSTRA DE SOLO SILTOSO 2 PARA ENSAIO EM PERMEÂMETRO.

Peso específico (kN/m³)	Umidade gravimétrica inicial (%)	Peso específico seco (kN/m³)	Índice de vazios	Porosidade (%)
17,23	27	13,57	0,90	47,4

A sequência de imagens a seguir (Figura 3.60) mostra o processo de compactação e instalação das sondas de TDR para o solo siltoso 1. A Figura 3.61 indica o topo da coluna de solo siltoso 2 ao final da compactação e instalação das sondas de TDR.

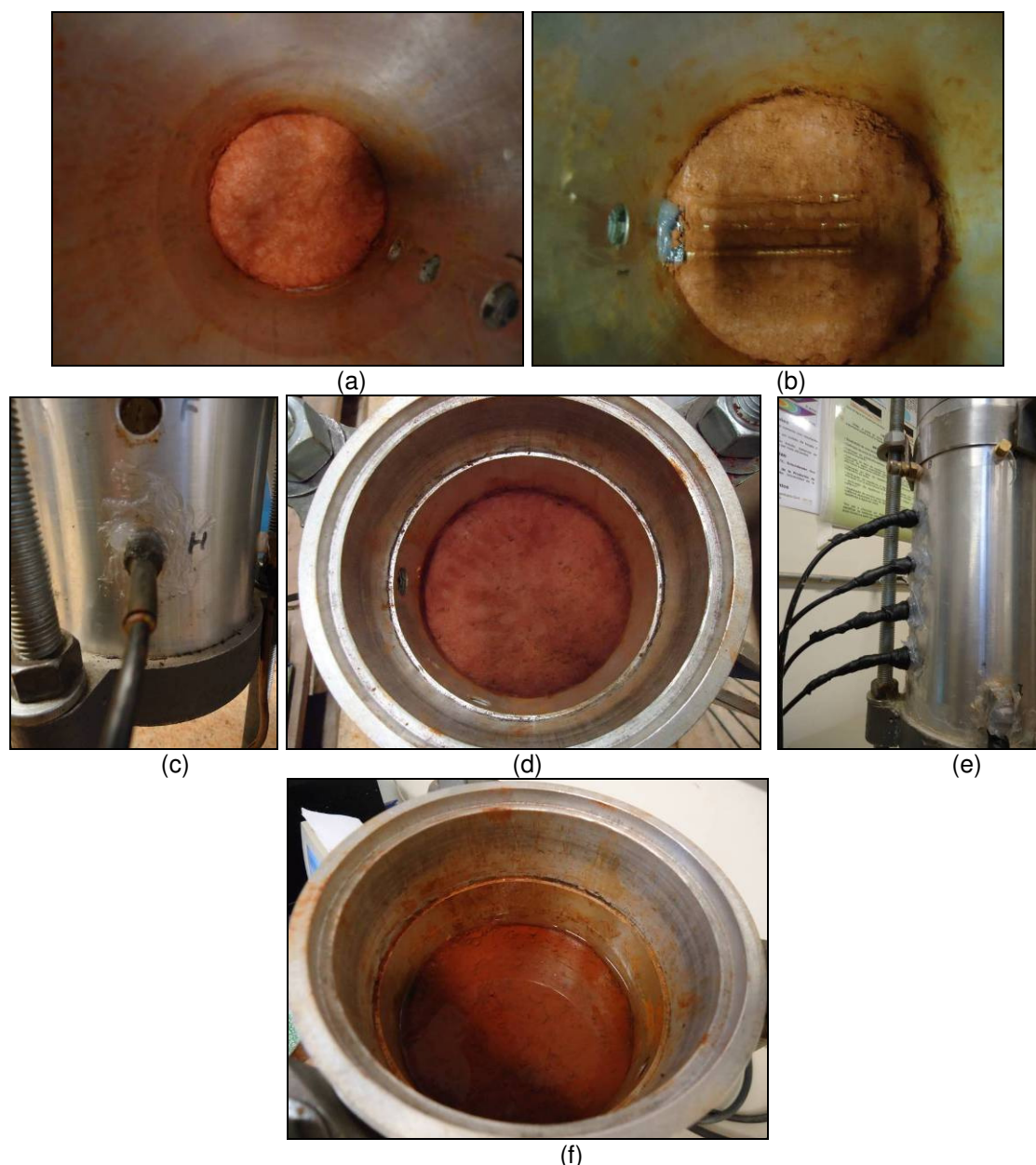


FIGURA 3.60 – COMPACTAÇÃO DO SOLO SILTOSO 1 NO PERMEÂMETRO: (a) PRIMEIRA CAMADA COMPACTADA COM SOQUETE; (b) INSTALAÇÃO E COMPACTAÇÃO MANUAL DA SONDA DE TDR; (c) VEDAÇÃO EXTERNA DA SONDA DE TDR COM COLA DE SILICONE; (d) TOPO DA COLUNA DE SOLO DE 25 CM AO FINAL DA COMPACTAÇÃO; (e) VEDAÇÃO EXTERNA DAS SONDAS DE TDR COM FITA ADESIVA IMPERMEABILIZANTE; (f) ADIÇÃO DE ÁGUA AO TOPO DA COLUNA DE SOLO.



FIGURA 3.61 – SOLO SILTOSO 2 COMPACTADO NO CILINDRO DO PERMEÂMETRO.

3.3.3 Procedimento de ensaio

O ensaio para determinação da Função-K do solo com aplicação de pressão ao topo da amostra em permeâmetro compreende basicamente duas etapas: saturação do solo e drenagem sobre pressão com monitoramento do fluxo de saída e do perfil de umidade/sucção.

Para a saturação acrescenta-se água em quantidade suficiente, previamente calculada com base nas condições iniciais da amostra (umidade e massa), ao topo do solo e aguarda-se a drenagem sem aplicação de pressão. Após instalação do nível d'água na altura desejada (altura de 5 cm a partir da base do permeâmetro), aplica-se pressão de ar ao reservatório inferior preenchido completamente com água destilada para saturação da base para o topo do solo. Ao longo do processo o perfil de umidade é constantemente monitorado com leituras das sondas de TDR, a fim de permitir a detecção da saturação (quando a umidade é máxima em toda a coluna de solo).

Mesmo com a pressurização de água na base do permeâmetro, a fim de garantir maior grau de saturação da amostra para início dos ensaios, não foi possível obter saturação completa dos solos finos. Dessa forma, os solos foram considerados naturalmente saturados. Para o solo siltoso 1, o grau de saturação ao início do ensaio foi de cerca de 85 % e, de 81%, para o solo siltoso 2. Para a areia o grau de saturação ao início do ensaio chegou a 100%.

Após a saturação, o reservatório inferior é desacoplado do aparato, sendo as mangueiras, que captam o fluxo de saída, conectadas a um recipiente plástico ligado a uma balança.

A pressão de ar é aplicada através da conexão no topo do permeâmetro ligada à linha de ar pressurizado. A pressão é regulada por meio da válvula Bellofram e medida pelo manômetro. No momento em que a pressão é aplicada, o cronômetro é acionado para determinação precisa do tempo de ensaio.

O recipiente plástico fica aberto para atmosfera e recebe uma pequena quantidade de óleo (Figura 3.62) capaz de prevenir a evaporação da água de fluxo de saída, o que poderia ocorrer nos ensaios mais longos, com os solos finos.



FIGURA 3.62 – RECIPIENTE PLÁSTICO DE COLETA DE ÁGUA COM ÓLEO A FIM DE EVITAR A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DE FLUXO DE SAÍDA PARA ENSAIOS MAIS LONGOS.

Inicialmente realiza-se ensaio sem pressão. A pressão é gradualmente aumentada após detecção do término do fluxo de saída em cada estágio. As pressões de ar aplicadas em cada estágio dos ensaios são indicadas na Tabela 3.24.

TABELA 3.24 – PRESSÕES DE AR APLICADAS EM CADA ENSAIO EM PERMEÂMETRO.

Pressão de ar aplicada (kPa)		
Areia	Silte 1	Silte 2
0	0	0
39,24	19,62	98,10
58,86	29,43	196,20
	39,24	245,25
	49,05	294,30
	58,86	

A pressão de ar aplicada variou para cada tipo de solo. Para areia foram considerados os valores mais baixos possíveis de serem medidos com o manômetro disponível, intervalo de 0,2 bar (19,62 kPa). Após os ensaios com areia trocou-se o manômetro utilizado por um mais sensível, com intervalo de medição de 0,1 bar (9,81 kPa), utilizado para os solos finos. Para o solo fino 2 os valores de pressão de ar aplicados foram mais elevados, com o intuito de reduzir o tempo de ensaio, visto que esse solo apresentou permeabilidade saturada muito baixa.

Em cada estágio de pressão são realizadas leituras da balança e das sondas de TDR em diferentes períodos de tempo (0, 1, 2, 4, 8, 15, 30 e posteriormente de 15 em 15 minutos até as primeiras horas de ensaio, após esse período o intervalo de medição é variável conforme as condições do solo).

Para o solo arenoso cada estágio de pressão foi realizado em poucos minutos (de 21 a 164 minutos). Para o solo siltoso 1 cada estágio foi realizado em 24 horas, com exceção do estágio inicial (sem aplicação de pressão). Para o solo siltoso 2, com menor permeabilidade, os estágios levaram de 5 a 2 dias conforme efetuava-se o aumento da pressão de ar.

Com base nas leituras das sondas de TDR e na curva de calibração destas determina-se a o perfil instantâneo de umidade gravimétrica. A umidade volumétrica é então calculada, com base na umidade gravimétrica e no peso específico seco do solo.

A sucção é determinada a partir da umidade volumétrica, com base na curva de retenção de umidade do solo ajustada pelo modelo de van Genuchten, e considerando a pressão de ar aplicada a cada estágio. Para o estágio sem pressão, a sucção é dada diretamente pela conversão da umidade volumétrica, obtida pelas leituras das sondas de TDR, em sucção por meio do modelo de van Genuchten. Para ensaio com pressurização a sucção será a

pressão de água subtraída da pressão de ar, sendo a pressão de ar imposta conhecida e a pressão de água determinada com base na leitura das sondas de TDR e na CRUS do solo.

Assim: $\psi = -u_w$, para ensaio sem pressurização, e $\psi = u_a - u_w$, para ensaio com pressurização. u_a é a pressão de ar imposta a cada estágio. u_w é a pressão de água obtida por meio das leituras das sondas de TDR transformadas em umidade volumétrica a partir das curvas de calibração das sondas (Tabela 3.21) e convertidas em sucção (pressão de água negativa) por meio da CRUS (modelo de van Genuchten) .

Para determinação da condutividade hidráulica não saturada aplica-se a lei de Buckingham-Darcy (Equação 2.21). No caso do ensaio com aplicação de pressão de ar ao topo do solo, o potencial hidráulico será dado pela Equação 2.22 sem a simplificação convencional de que a pressão de ar (u_a) é nula. Essa simplificação é realizada normalmente para dedução da equação de Richards (Equação 2.26), mas não é válida quando se aplica pressão ao solo. Dessa forma, nesse caso específico, o potencial hidráulico será:

$$h = z + \frac{(u_a - \psi)}{\rho_w g} = z + \frac{u_a}{\rho_w g} - h_m \quad (3.15)$$

Onde z é a carga de elevação, u_a a pressão de ar e h_m o potencial mátrico ($\psi / \rho_w g$).

Substituindo a Equação 3.15 na Equação 2.21 e deixando $K(\psi)$ em evidência obtém-se a Equação 3.16, aplicada para determinação da condutividade hidráulica não saturada a cada estágio de pressurização do permeâmetro.

$$K(\psi) = - \frac{\bar{v}}{\left[1 + \frac{1}{\rho_w g} \left(\frac{\partial u_a}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right]} \quad (3.16)$$

Onde $K(\psi)$ é a condutividade hidráulica não saturada, \bar{v} é a velocidade de descarga de água média, $\overline{\frac{\partial \psi}{\partial z}}$ é o gradiente de sucção médio ao longo da amostra e $\overline{\frac{\partial u_a}{\partial z}}$ é o gradiente de pressão de ar ao longo da amostra. Essa equação é análoga à Equação 3.2, considerando ambiente sem gravidade induzida (fora de centrífuga). Os termos de velocidade de descarga e gradiente de pressão e de sucção denotam médias entre estágios sucessivos de pressurização.

Caso assuma-se que o gradiente de pressão de ar é nulo na maior parte da amostra, ou seja, a pressão de ar é constante ao longo da coluna de solo, o termo $\overline{\frac{\partial u_a}{\partial z}}$ torna-se nulo e a equação transforma-se em:

$$K(\psi) = -\frac{\bar{v}}{\left[1 - \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial \psi}{\partial z}\right]} \quad (3.17)$$

Essa equação também é obtida quando se considera a simplificação de pressão de ar nulo (atmosférica) diretamente na Lei de Darcy.

Em muitos casos indicados na literatura (Prevedello *et al.*, 1994) utiliza-se a simplificação de gradiente de sucção nulo ao longo da amostra, considerando que a sucção apresenta-se constante na maior parte da coluna de solo, decrescendo apenas na base, próximo à zona de saturação. Com essa simplificação a Equação 3.17 pode ser modificada para:

$$K(\psi) = -\bar{v} \quad (3.18)$$

A velocidade de descarga média é determinada considerando a variação do volume de água que sai do solo ao longo do tempo e a área da amostra, conforme a seguinte formulação:

$$\bar{v} = \frac{\Delta V}{A \cdot t_{médio}} \quad (3.19)$$

Assim como efetuado para análise da Função-K em centrífuga, o tempo médio para chegada à condição de equilíbrio (ausência de fluxo de saída) é determinado através de procedimento gráfico, no qual plota-se o volume de água do fluxo de saída em função da raiz quadrada do tempo. Como nesse caso (ensaio com o permeâmetro), mede-se a quantidade de água que deixa o solo ao longo do tempo, o comportamento da curva $V \times \sqrt{t}$ é oposto ao comportamento em centrífuga, para o qual se verificava o volume de água dentro do solo. Assim, em centrífuga mede-se a redução do volume de água dentro do solo, gerando um gráfico de volume decrescente com o tempo e, em permeâmetro, mede-se o aumento do volume de saída de água do solo, gerando um gráfico com volume ascendente ao longo do tempo até o equilíbrio (Figura 3.63).

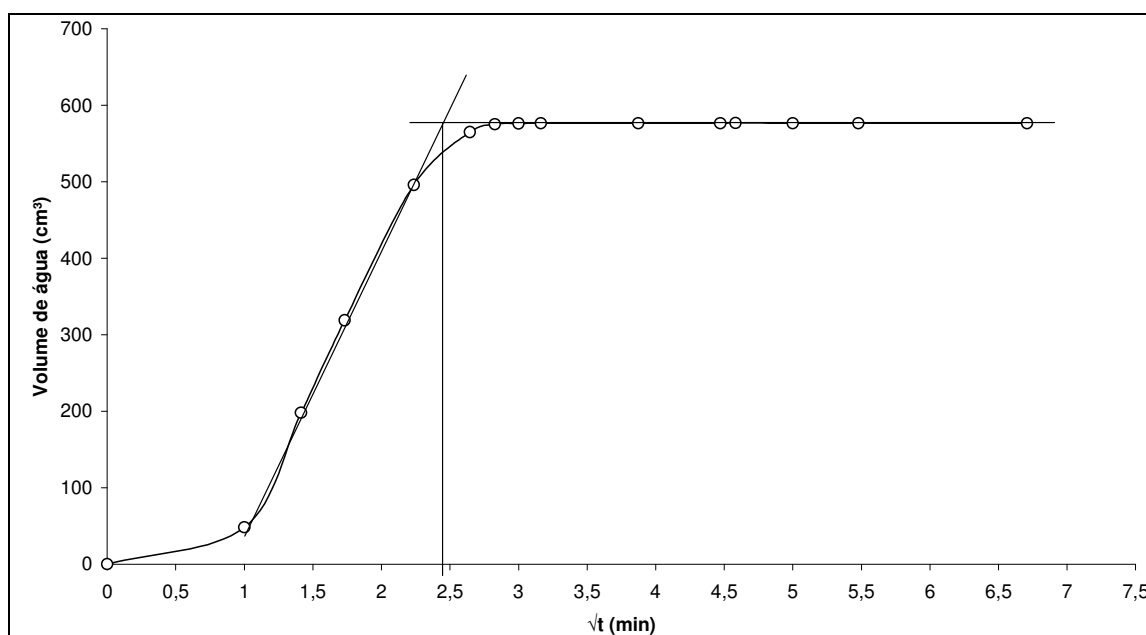


FIGURA 3.63 – EXEMPLO DE CURVA DE VOLUME DA ÁGUA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA ENSAIO EM PERMEÂMETRO.

O termo $\overline{\frac{\partial \psi}{\partial z}}$, gradiente de sucção médio, é computado considerando o gradiente médio entre dois estágios sucessivos de pressurização:

$$\overline{\frac{\partial \psi}{\partial z}} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial z}_{inicial} + \frac{\partial \psi}{\partial z}_{final} \right) / 2 \quad (3.20)$$

O gradiente de sucção a cada tempo é dado pela razão entre a diferença de sucção no topo e na base, considerando as leituras das sondas de TDR 1 e 4, que indicam respectivamente topo e base do solo, e a distância entre estas sondas:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\psi_{s1} - \psi_{s4}}{15} \quad (3.21)$$

O gradiente de sucção pode também ser calculado considerando que a base do permeâmetro está saturada, ou seja, apresenta sucção nula:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\psi_{s1}}{17,5} \quad (3.22)$$

Alternativamente, também é possível computar o gradiente médio como a média dos gradientes obtidos para cada tempo de leitura ao longo de todo um estágio de pressão no qual são realizadas várias leituras, não apenas considerando o início e final do estágio.

A utilização da Equação 3.21 ou da Equação 3.22 não altera significativamente o resultado de condutividade hidráulica obtido. Para o ensaio com areia a diferença de condutividade hidráulica estimada considerando as diferentes formas de obtenção do gradiente de sucção foi de menos do que 10^{-7} m/s.

O termo $\overline{\frac{\partial u_a}{\partial z}}$, gradiente de pressão, é computado considerando o gradiente médio de pressão de ar entre dois estágios sucessivos de pressurização.

$$\overline{\frac{\partial u_a}{\partial z}} = \left(\frac{\partial u_a}{\partial z}_{inicial} + \frac{\partial u_a}{\partial z}_{final} \right) / 2 \quad (3.23)$$

Supondo variação linear da pressão ao longo da coluna de solo e considerando que o gradiente de pressão é dado pela razão entre a diferença de pressão na coluna e a altura de solo considerada, tem-se:

$$\frac{\partial u_a}{\partial z} = \frac{u_{a(topo)} - u_{a(base)}}{H_{amostra}} \quad (3.24)$$

Onde $u_{a(topo)}$ é a pressão de ar aplicada no topo da amostra, $u_{a(base)}$ é a pressão de ar na base da amostra, sendo igual à pressão atmosférica ($u_{a(base)} = 0$) visto que as aberturas na base no permeâmetro ficam abertas para a atmosfera e $H_{amostra}$ é a altura da amostra de solo medida a partir do nível d'água (aberturas na base do cilindro do corpo de prova).

Como indicado na Equação 3.17 é possível assumir que a pressão é constante ao longo da maior parte da coluna de solo de forma que o gradiente médio de pressão seja nulo.

Além da análise diretamente pela equação de Buckingham-Darcy, para este ensaio, como são obtidas leituras de umidade ao longo do tempo, também é possível aplicar diretamente a equação de Richards (modificada com acréscimo do termo de pressão de ar) para determinação da Função-K:

$$K(\psi) = -\frac{\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\left. \frac{\partial h}{\partial z} \right|_z} = -\frac{\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\left[1 + \frac{1}{\rho_w g} \left. \frac{\partial u_a}{\partial z} \right|_z - \frac{1}{\rho_w g} \left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_z \right]} \quad (3.25)$$

Em todos os casos, o valor de $K(\psi)$ deve ser associado ao valor da sucção média no centro da amostra ao final do ensaio, o qual é calculado considerando a média das leituras das sondas de TDR números 2 e 3 (localizadas nas alturas de 12,5 e 7,5 cm, respectivamente) ao final do ensaio.

$$\psi = \frac{\psi_{s2} + \psi_{s3}}{2} \quad (3.26)$$

As diferentes equações e simplificações apresentadas consistem em maneiras distintas de analisar os dados do ensaio em permeâmetro. Como não há dados de literatura que indiquem a metodologia para análise de ensaio de condutividade hidráulica não saturada com aplicação de pressão de ar, um dos objetivos deste estudo foi analisar a melhor forma de avaliação dos dados medidos para determinação dessa variável. Assim, no Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada uma das análises possíveis de forma a considerar também os erros associados a cada simplificação realizada.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CENTRÍFUGA

4.1.1 Curva de retenção de umidade do solo

A curva de retenção de umidade para os solos finos (silte 1 e silte 2) foi obtida através de ensaio em centrífuga e comparada aos resultados de papel filtro apresentados nos itens 3.1.2.3 (silte 1) e 3.1.3.2 (silte 2).

Para determinação da CRUS em centrífuga efetuou-se um ensaio exclusivo para CRUS (ensaio 1) e um ensaio conjunto para CRUS e Função-K (ensaio 2). Isto possibilitou a utilização de diferentes placas cerâmicas nos dois ensaios. Desta forma, a CRUS para os solos finos foi obtida utilizando três placas cerâmicas diferentes de 50 mm, 24 mm e 13 mm, sendo que para a placa cerâmica de 13 mm obteve-se dois grupos de resultados visto que esta foi utilizada em ambos os ensaios.

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 apresentam os pontos de umidade volumétrica em função da sucção para o solo siltoso 1.

TABELA 4.1 – VALORES DE SUCÇÃO E UMIDADE VOLUMÉTRICA OBTIDOS EM ENSAIO EM CENTRÍFUGA COM O SOLO SILTOSO 1.

Placa cerâmica	13 mm – ensaio 1		13 mm – ensaio 2		24 mm		50 mm	
Velocidade (rpm)	ψ (kPa)	θ (%)	ψ (kPa)	θ (%)	ψ (kPa)	θ (%)	ψ (kPa)	θ (%)
300	3,00	51,02	3,00	43,16	5,02	41,48	8,12	45,03
500	8,32	36,95	8,323	35,95	13,95	35,12	22,55	35,66
1000	33,29	32,77	33,29	32,52	55,81	32,14	90,19	33,41
1500	74,91	31,65	74,91	31,34	125,58	31,20	202,93	32,32
2000	133,17	31,00	133,17	30,34	223,25	30,29	360,76	31,58
2500	208,08	30,32	208,08	29,18	348,84	29,29	563,68	30,95
3000	299,63	29,59	299,63	28,60	502,32	28,73	811,70	30,21

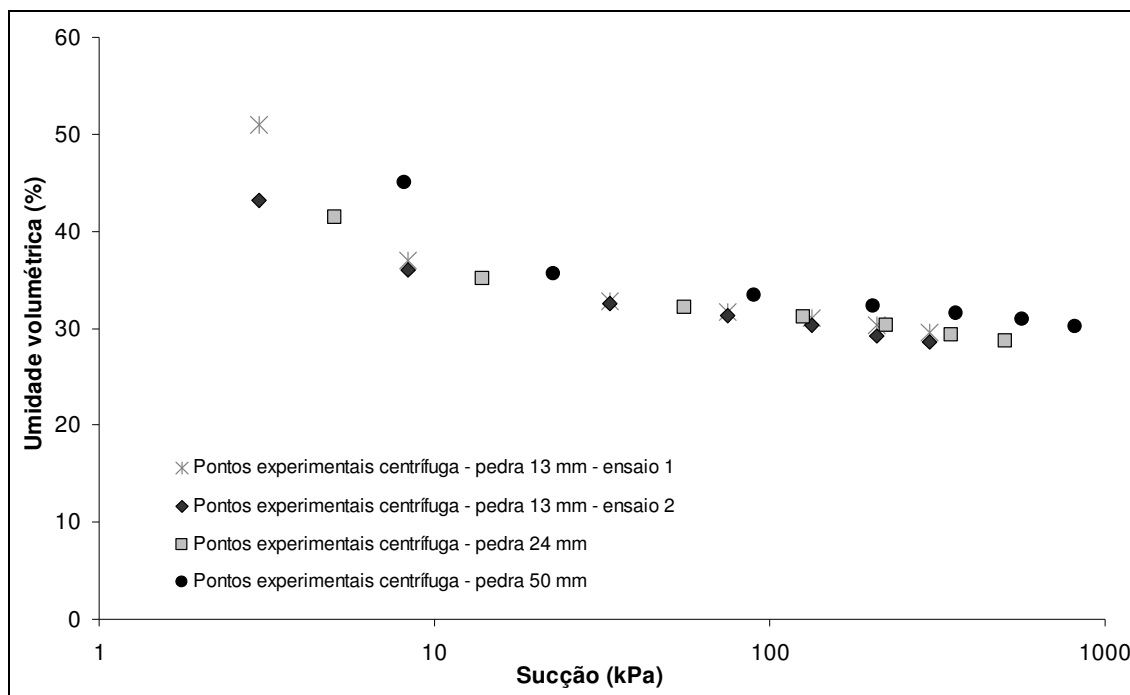


FIGURA 4.1 – PONTOS EXPERIMENTAIS DA CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO OBTIDOS EM ENSAIO EM CENTRÍFUGA COM O SOLO SILTOSO 1.

A Tabela 4.2 e a Figura 4.2 apresentam os pontos de umidade volumétrica em função da sucção para o solo siltoso 2.

TABELA 4.2 – VALORES DE SUCÇÃO E UMIDADE VOLUMÉTRICA OBTIDOS EM ENSAIO EM CENTRÍFUGA COM O SOLO SILTOSO 2.

Placa cerâmica	13 mm – ensaio 1		13 mm – ensaio 2		24 mm		50 mm	
Velocidade (rpm)	ψ (kPa)	θ (%)	ψ (kPa)	θ (%)	ψ (kPa)	θ (%)	ψ (kPa)	θ (%)
300	2,98	47,36	2,98	46,43	5,02	47,07	8,13	48,65
500	8,28	45,48	8,279	45,24	13,95	45,53	22,59	46,26
1000	33,12	42,77	33,12	42,70	55,81	42,73	90,35	43,43
1500	74,51	40,94	74,51	40,58	125,58	40,75	203,30	41,38
2000	132,46	39,17	132,46	38,92	223,25	39,21	361,42	39,38
2500	206,97	37,63	206,97	36,93	348,84	37,22	564,72	37,43
3000	298,04	35,94	298,04	35,03	502,32	35,25	813,19	35,21

Os pontos experimentais para os dois ensaios com pedra cerâmica de 13 mm ficaram sobrepostos para todos os valores de sucção, com exceção de apenas um, referente ao primeiro estágio de rotação, com sucção de 3 kPa (velocidade de rotação de 300 rpm). Isto indica uma boa repetibilidade do

método, pois ensaios diferentes com imposição das mesmas condições às amostras resultam em valores de $\theta \times \psi$ semelhantes.

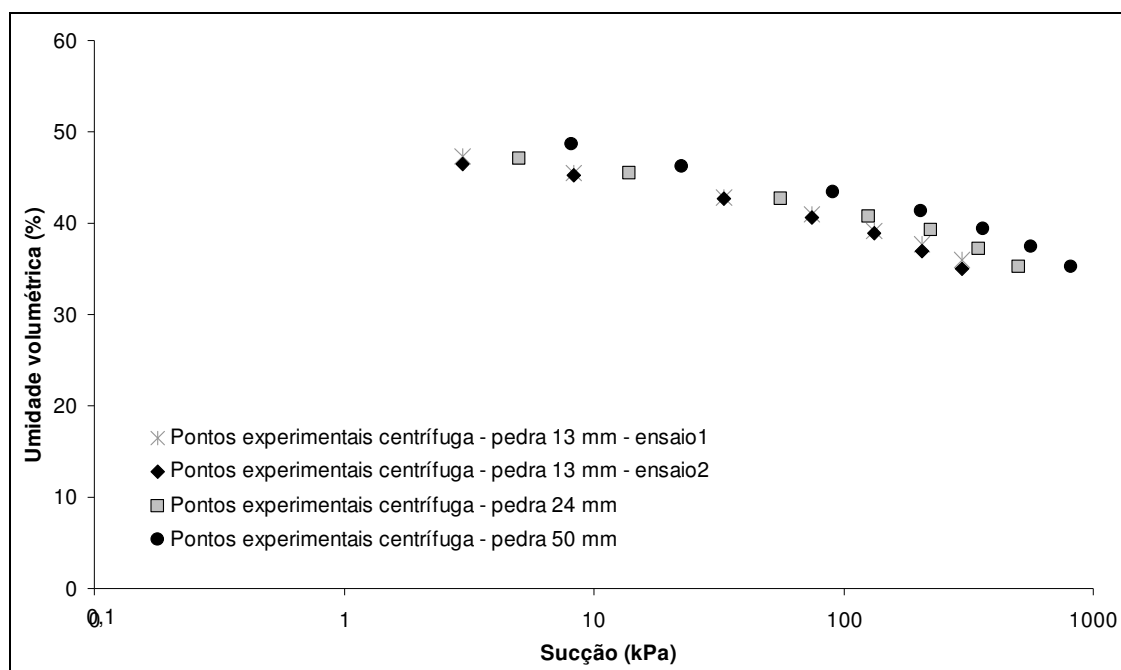


FIGURA 4.2 – PONTOS EXPERIMENTAIS DA CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DO SOLO OBTIDOS EM ENSAIO EM CENTRÍFUGA COM O SOLO SILTOSO 2.

No que se refere à variação dos resultados com relação à espessura da pedra cerâmica utilizada, nota-se que com o aumento da pedra cerâmica os valores de umidade volumétrica medidos tendem a ser levemente aumentados.

Conforme resultados apresentados na Tabela 4.2 verifica-se que a sucção máxima obtida nos ensaios foi de 813 kPa, para placa cerâmica de 50 mm. Valores acima deste patamar podem ser determinados por meio de papel filtro ou empregando placa cerâmica de maior espessura, recomendadas apenas para ensaio não simultâneos de CRUS e Função-K visto que quanto maior a placa maior o tempo para estabilização. Sterck (2011) realizou ensaio com placa de 63mm obtendo valor de sucção até 900 kPa.

A Figura 4.3 e a Figura 4.4 indicam o ajuste de van Genuchten aos dados experimentais obtidos em centrífuga e a comparação com a curva ajustada para os resultados do método de papel filtro para os dois solos finos.

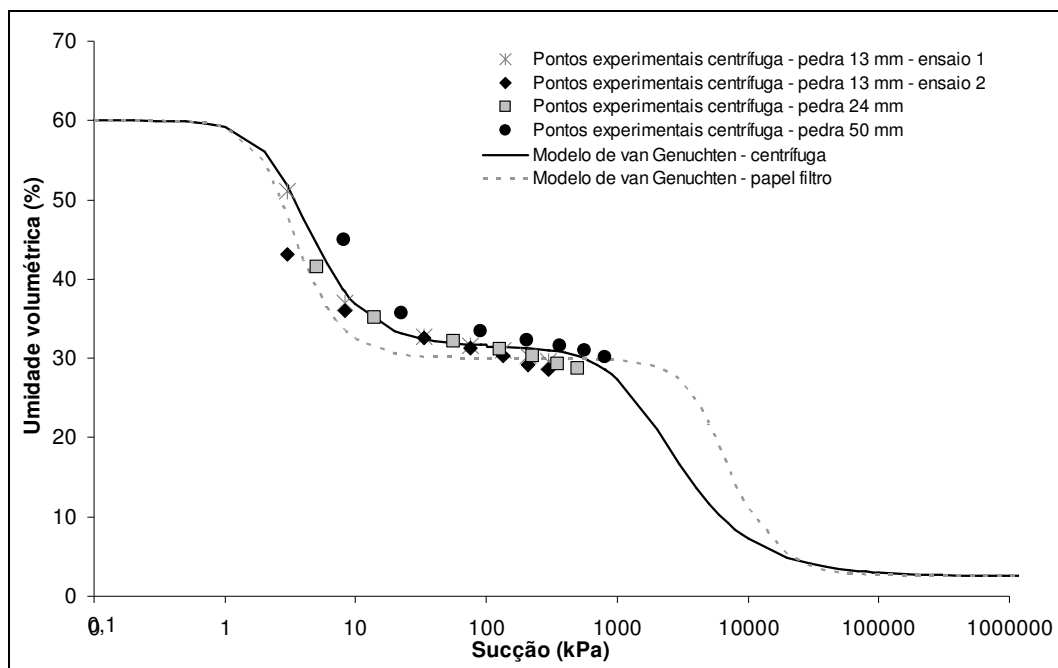


FIGURA 4.3 – AJUSTE DE VAN GENUCHTEN AOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E COMPARAÇÃO COM A CURVA OBTIDA PELO MÉTODO DE PAPEL FILTRO PARA O SOLO SILTOSO 1.

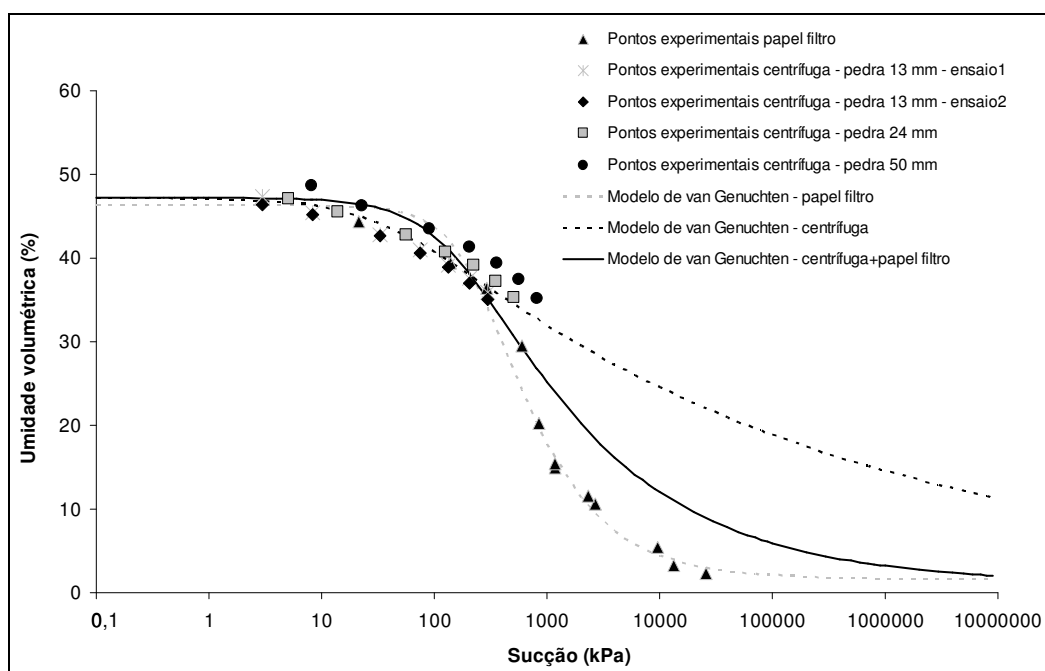


FIGURA 4.4 – AJUSTE DE VAN GENUCHTEN AOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E COMPARAÇÃO COM A CURVA OBTIDA PELO MÉTODO DE PAPEL FILTRO PARA O SOLO SILTOSO 2.

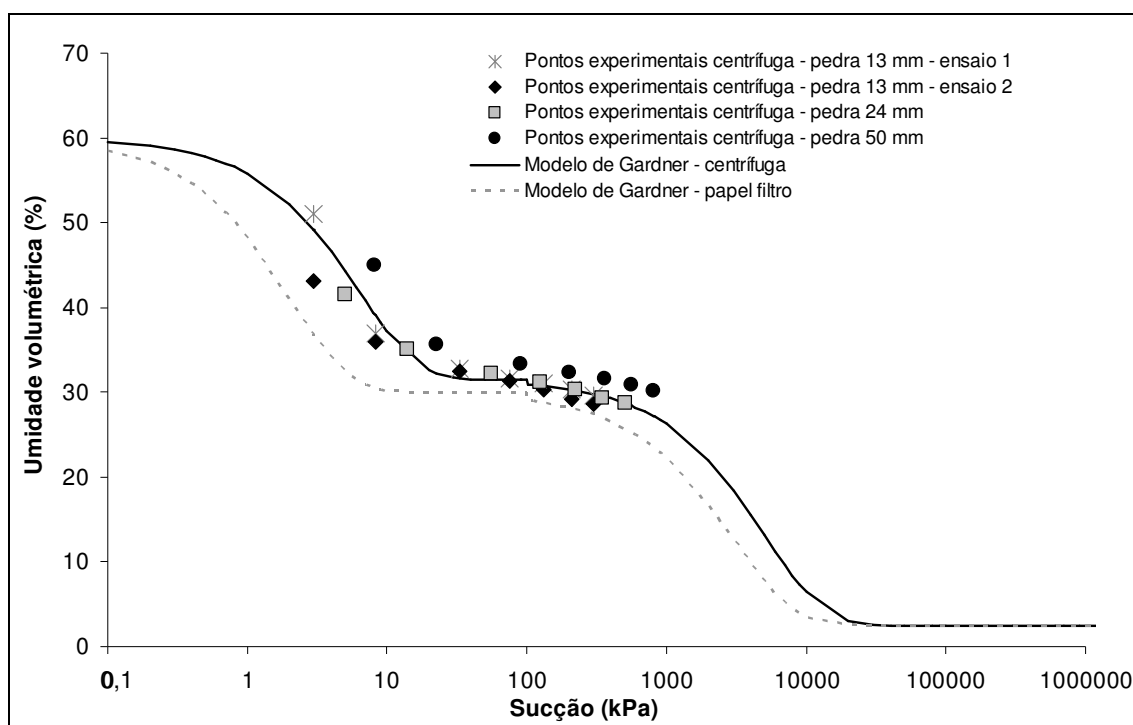


FIGURA 4.5 – AJUSTE DE GARDNER AOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E COMPARAÇÃO COM A CURVA OBTIDA PELO MÉTODO DE PAPEL FILTRO PARA O SOLO SILTOSO 1.

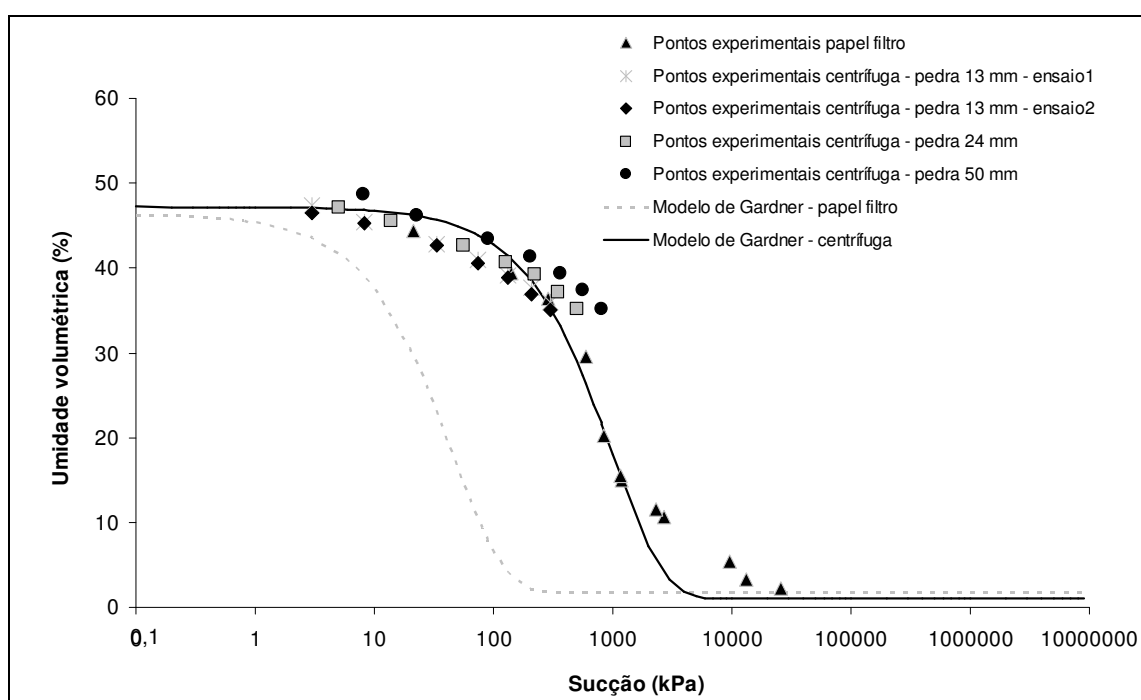


FIGURA 4.6 – AJUSTE DE GARDNER AOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E COMPARAÇÃO COM A CURVA OBTIDA PELO MÉTODO DE PAPEL FILTRO PARA O SOLO SILTOSO 2.

Para o solo siltoso 2 foram ajustadas duas curvas segundo o modelo de van Genuchten, a primeira (tracejado preto na Figura 4.4) referente ao melhor ajuste considerando apenas os dados do ensaio em centrífuga e a segunda (linha contínua preta na Figura 4.4) indicando o melhor ajuste quando considerados os pontos experimentais obtidos em centrífuga e através de papel filtro. O método do papel filtro consegue estimar a relação umidade volumétrica-sucção para valores de sucção mais altos complementando a curva obtida em centrífuga.

TABELA 4.3 - PARÂMETROS DE AJUSTE DA CURVA DE RETENÇÃO DE UMIDADE DOS SOLOS FINOS EM CENTRÍFUGA.

Parâmetros	Silte 1		Silte 2	
	Ajuste 1 < 100 kPa	Ajuste 2 > 100 kPa	Ajuste centrífuga	Ajuste centrífuga e papel filtro
Umidade volumétrica na saturação (%)	60	31,5	47,2	47,2
Umidade volumétrica residual (%)	31,5	2,5	0,01	0,01
Parâmetro n de ajuste de van Genuchten	2,5	2,0	1,12	1,35
Parâmetro α de ajuste de van Genuchten (kPa^{-1})	0,3	0,0006	0,0275	0,006
Parâmetro b de ajuste de Gardner (kPa^{-1})	0,16	0,0002	0,001	

Para o primeiro ajuste de Gardner, referente aos dados experimentais obtidos pelo método do papel filtro, determinou-se o parâmetro b considerando o inverso do valor de entrada de ar no solo. Para o ajuste referente aos ensaios em centrífuga, o valor de entrada de ar fica muito próximo ao obtido através de papel filtro, de forma que a curva de ajuste de Gardner considerando o parâmetro b calculado se sobrepõe à curva obtida da mesma forma para o papel filtro. Assim, as curvas com ajuste de Gardner apresentadas por linhas pretas contínuas na Figura 4.5 e na Figura 4.6 consideraram um parâmetro b ajustado aos dados experimentais e não calculado pelo inverso do valor de entrada de ar como na situação anterior (linha tracejada cinza nas figuras citadas). Este novo ajuste foi efetuado, pois se verificou que a curva obtida através parâmetro b ajustado representa bem os pontos experimentais obtidos em centrífuga. No caso do solo siltoso 2, este ajuste de Gardner (Figura 4.6)

representou melhor o conjunto de pontos experimentais de centrífuga e papel filtro do que o ajuste pelo modelo de van Genuchten (Figura 4.4).

De forma geral, os resultados apresentam boa concordância com as curvas obtidas por meio do método do papel filtro e ajustes de van Genuchten e de Gardner (considerando parâmetro b ajustado).

4.1.2 Condutividade hidráulica não saturada

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 indicam os resultados de condutividade hidráulica em função da sucção obtidos através dos ensaios em centrífuga para os solos finos 1 e 2, respectivamente.

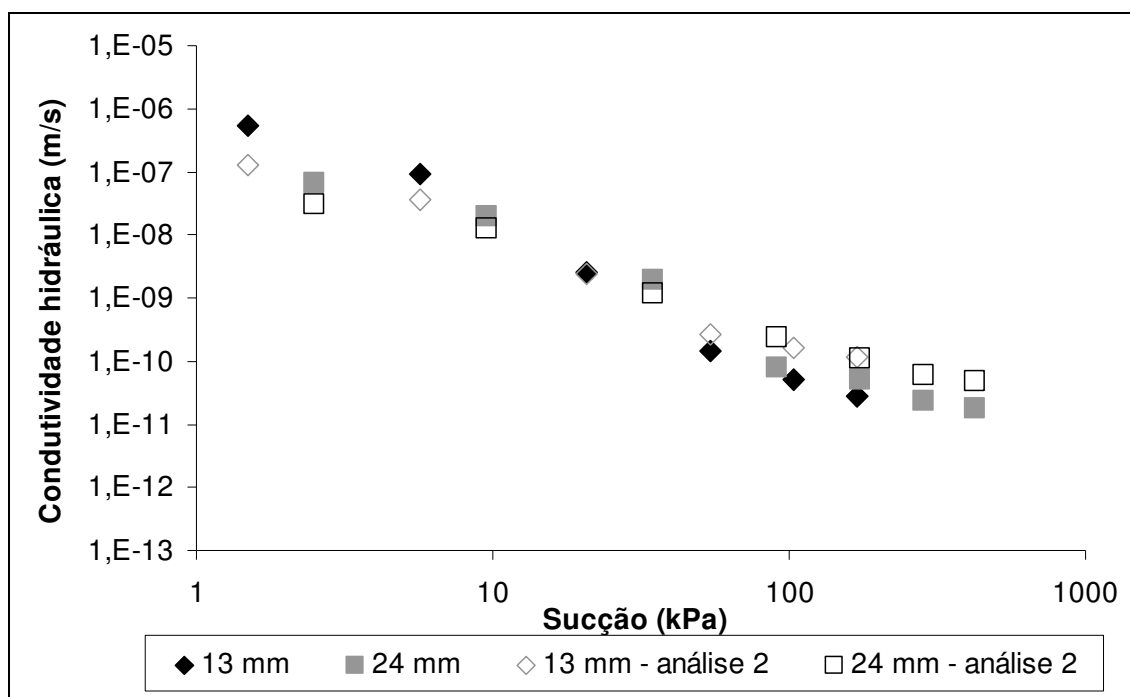


FIGURA 4.7 – RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM FUNÇÃO DA SUCÇÃO PARA ENSAIO EM CENTRÍFUGA COM O SOLO SILTOSO 1.

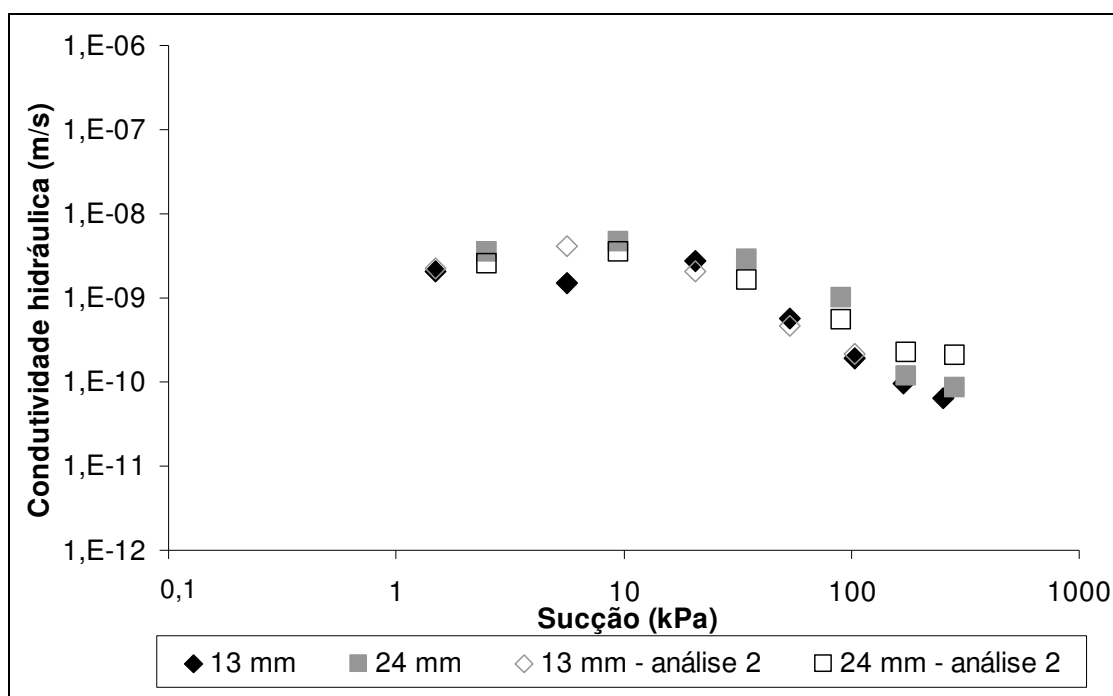


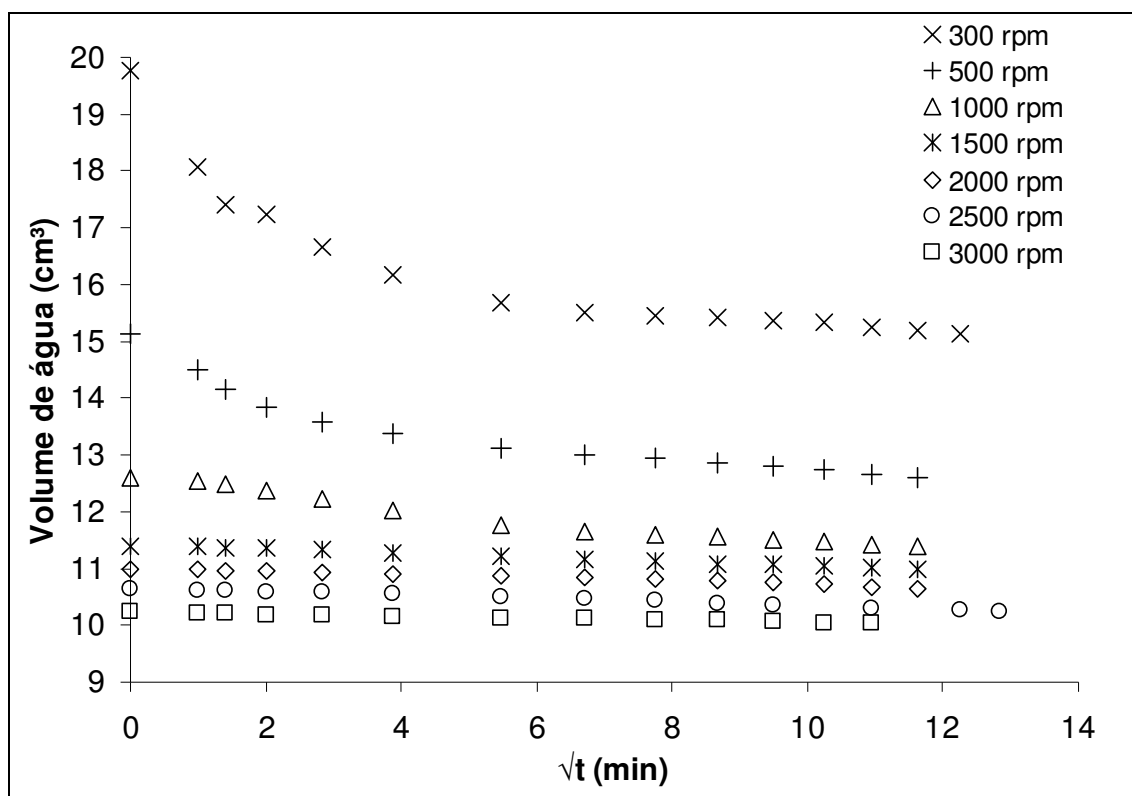
FIGURA 4.8 – RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM FUNÇÃO DA SUCÇÃO PARA ENSAIO EM CENTRÍFUGA COM O SOLO SILTOSO 2.

A análise 2, referenciada nos gráficos, indica a análise dos dados do ensaio através do gráfico de volume *versus* tempo ao invés de volume *versus* raiz quadrada do tempo. Para avaliação da condutividade hidráulica não saturada através do método em centrífuga é necessário que seja atingida a condição de equilíbrio de fluxo nulo através da amostra de solo. Esta condição é identificada através do monitoramento da variação do volume da amostra ao longo do tempo. Com base na relação entre volume e tempo, a cada estágio de ensaio, obtém-se o tempo médio do estágio, empregado na Equação 3.3 para determinação da condutividade hidráulica.

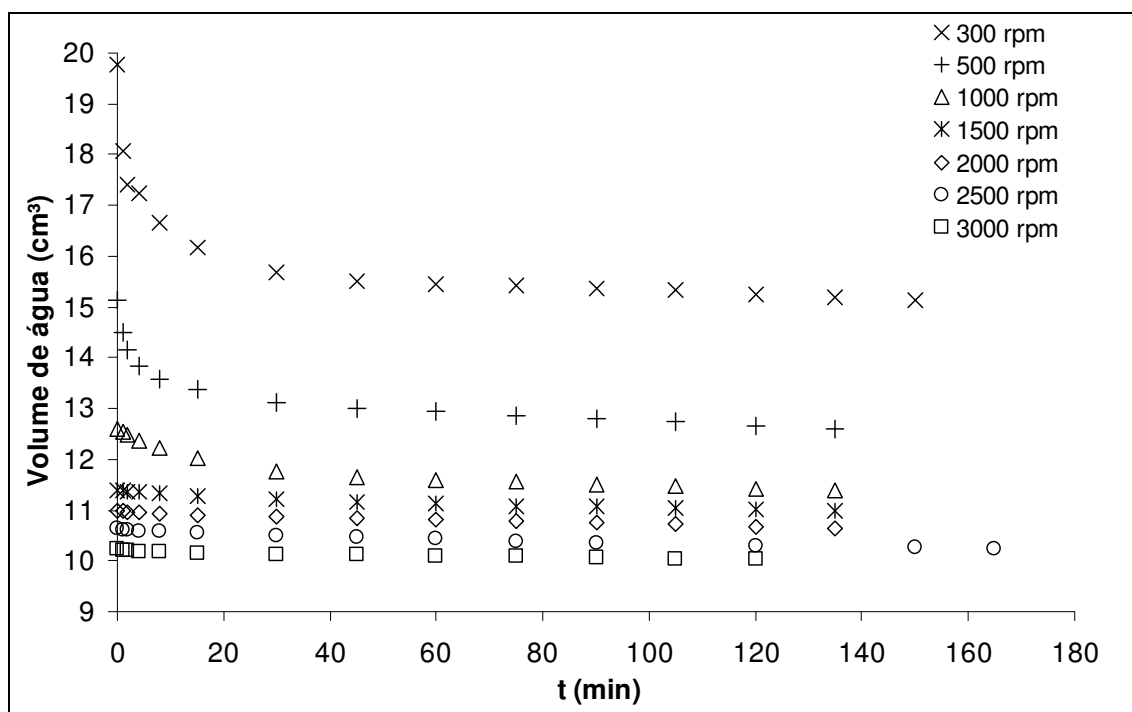
Como indicado no item 3.2.4 a análise gráfica para determinação do tempo médio foi efetuada considerando a variação do volume de água no solo em relação à raiz quadrada do tempo, da mesma forma realizada por Sterck (2011), e em relação ao tempo apenas. Esta abordagem alternativa foi necessária, pois em alguns casos os gráficos de $V \times \sqrt{t}$ não apresentaram assíntota horizontal bem definida.

A Figura 4.9 e a Figura 4.10 apresentam as relações entre $V \times \sqrt{t}$ (a) e $V \times t$ (b) para o solo siltoso 1 em ensaio com disco cerâmico de 13 e 24 mm,

respectivamente. A Figura 4.11 e a Figura 4.12 indicam as mesmas relações para o solo siltoso 2.

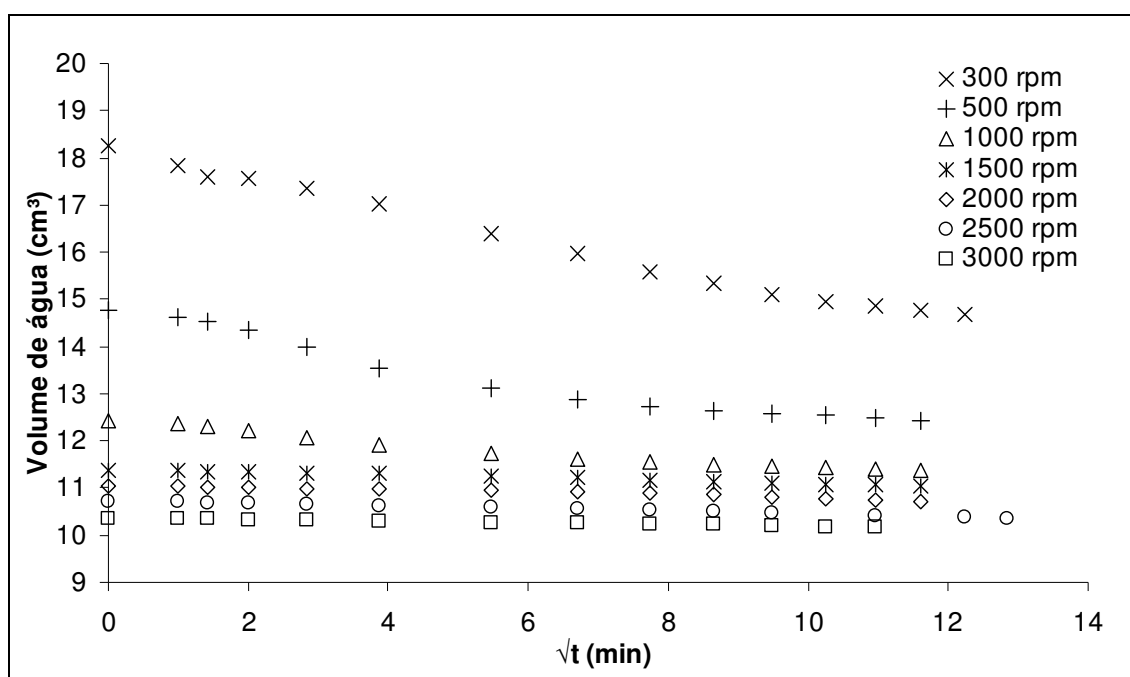


(a)

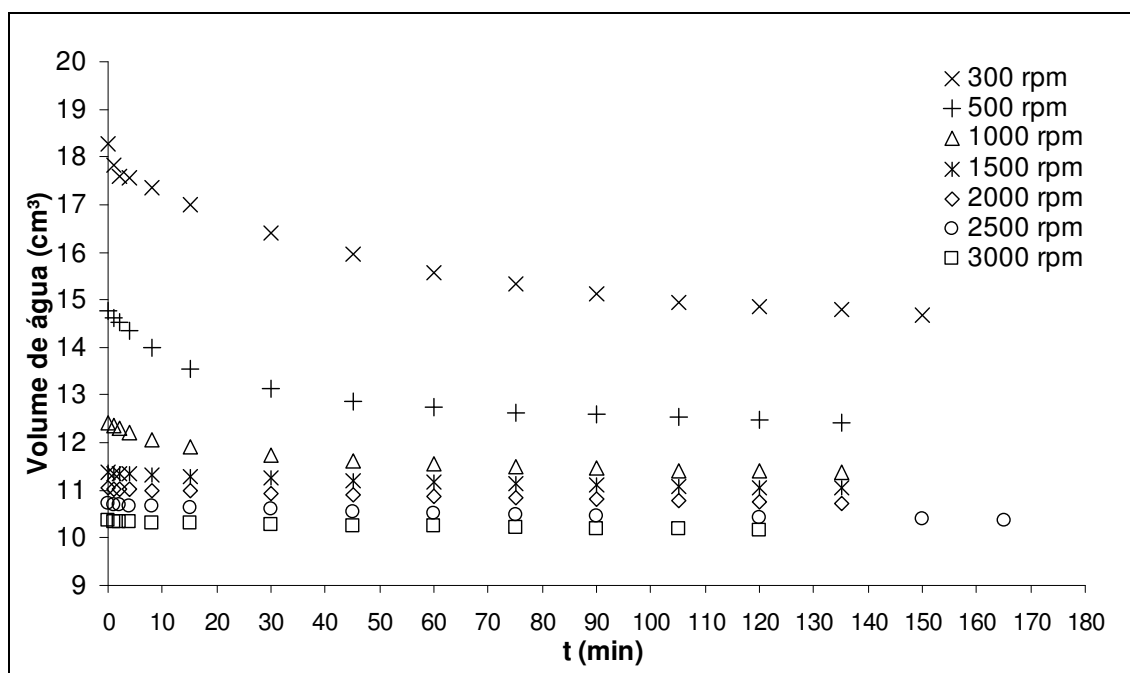


(b)

FIGURA 4.9 – CURVAS DE VOLUME DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRA DE SOLO SILTOSO 1 SOBRE PEDRA CERÂMICA DE 13 MM: (a) $V \times \sqrt{t}$ E (b) $V \times t$.

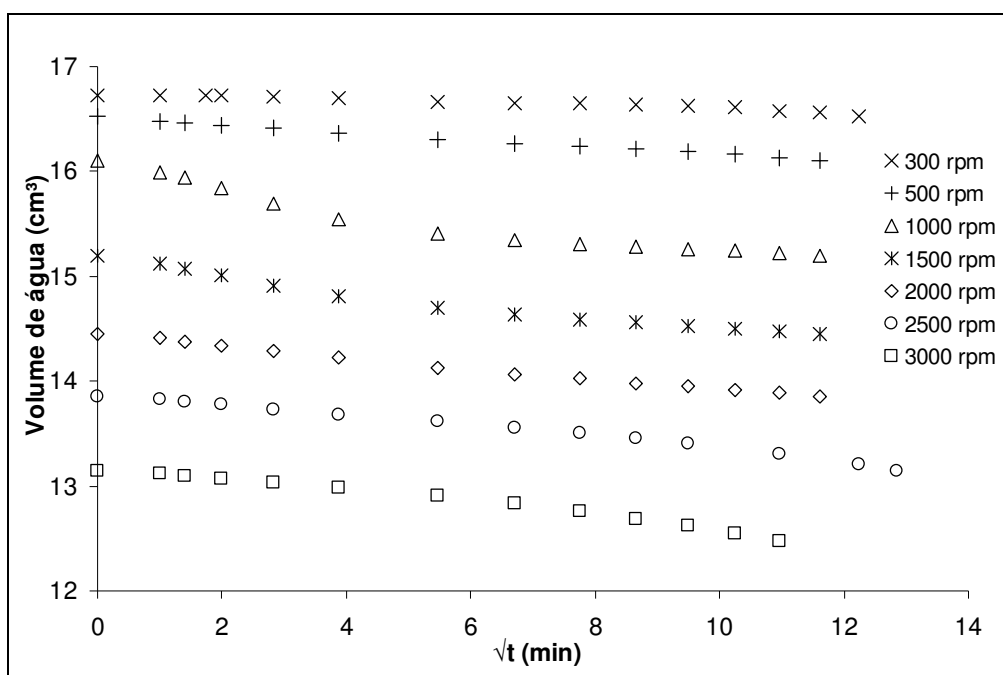


(a)

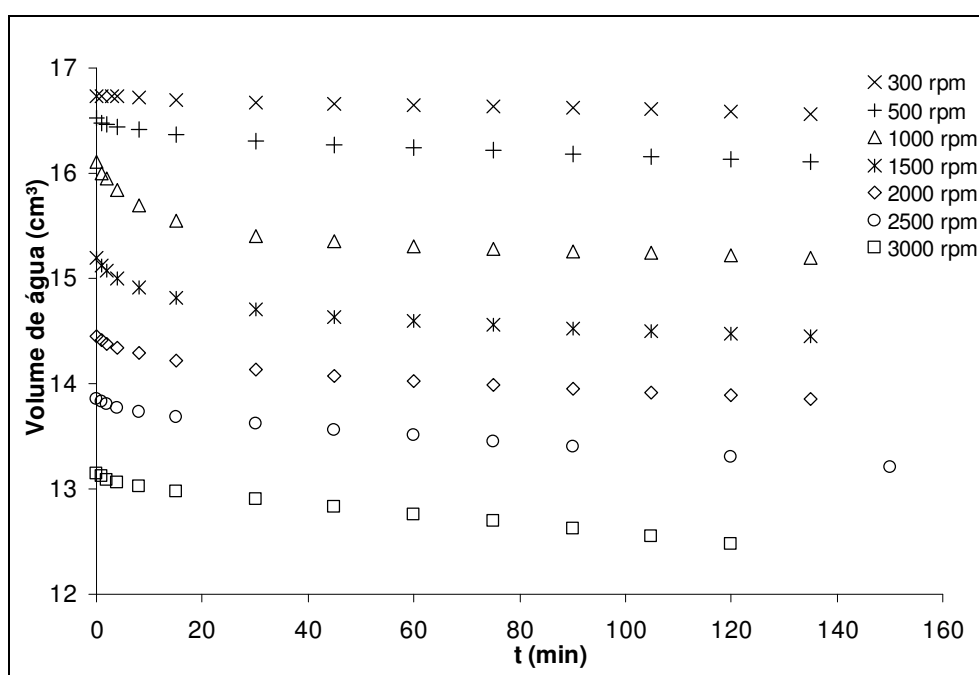


(b)

FIGURA 4.10 – CURVAS DE VOLUME DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRA DE SOLO SILTOSO 1 SOBRE PEDRA CERÂMICA DE 24 MM: (a) $V \times \sqrt{t}$ E (b) $V \times t$.

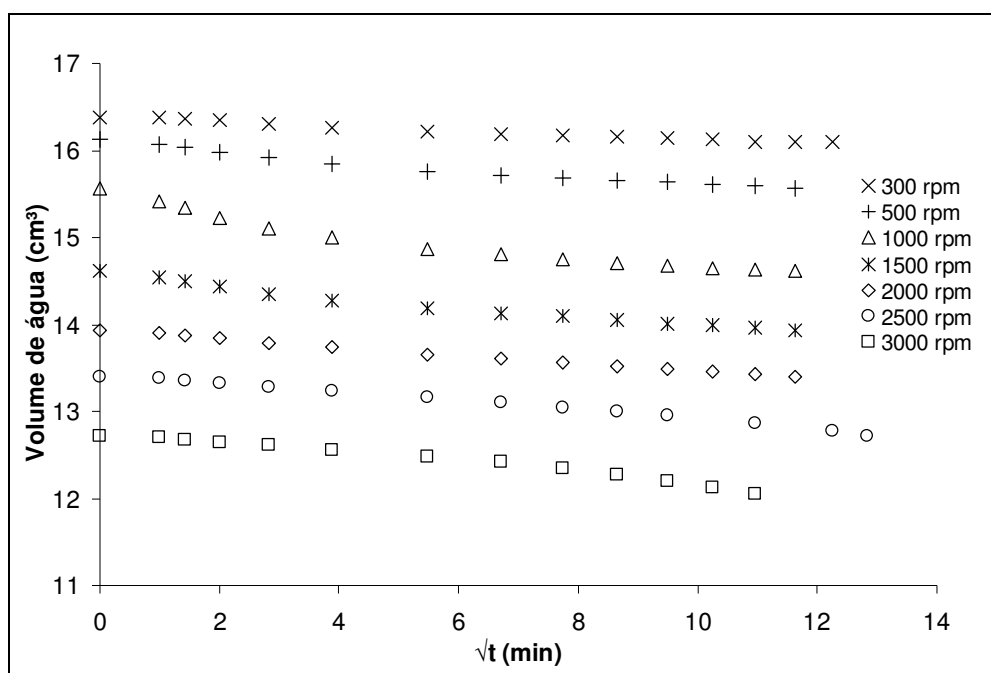


(a)

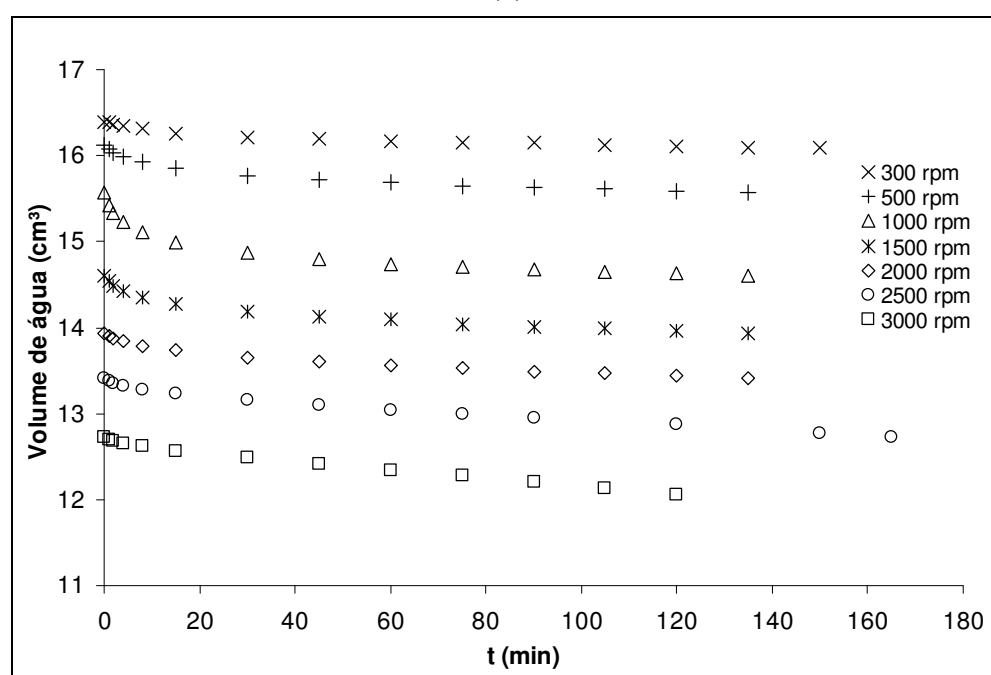


(b)

FIGURA 4.11 – CURVAS DE VOLUME DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRA DE SOLO SILTOSO 2 SOBRE PEDRA CERÂMICA DE 13 MM: (a) $V \times \sqrt{t}$ E (b) $V \times t$.



(a)



(b)

FIGURA 4.12 – CURVAS DE VOLUME DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRA DE SOLO SILTOSO 2 SOBRE PEDRA CERÂMICA DE 24 MM: (a) $V \times \sqrt{t}$ E (b) $V \times t$.

Verificou-se que a condição de equilíbrio foi atingida mais rapidamente para o solo siltoso 1, e que, por isso, as curvas para este solo apresentaram melhor comportamento. Este fato pode ser atribuído a maior permeabilidade do solo 1 em relação ao 2. Assim como identificado por Sterck (2011), o período

de tempo mínimo para equilíbrio das amostras de solo siltoso 1 sobre discos cerâmicos menos espessos se mostrou menor do que para discos mais espessos (24 mm). Para o solo siltoso 2 este comportamento foi praticamente imperceptível.

Em nenhum dos casos a curva final ficou completamente horizontal, a maioria das curvas tendeu a uma assíntota horizontal. Para velocidade acima de 1500 rpm a porção final da curva perde levemente à tendência para assíntota horizontal.

Algumas das relações obtidas apresentaram um comportamento mais próximo a uma reta ou curva em sentido oposto ao esperado. Dessa forma, alguns resultados, tanto para o solo siltoso 1 quanto para o solo siltoso 2, para altas velocidade angulares (2500 e 3000 rpm), tiveram que ser desprezados em vista da impossibilidade de determinação do tempo de equilíbrio pelo método gráfico. Nestes casos, chegou-se a conclusão de que o solo não havia chegado ao equilíbrio e com isso os dados gerados não poderiam ser analisados propriamente para obtenção da condutividade hidráulica não saturada. Em outros casos, apesar da dificuldade na leitura dos gráficos foi possível estabelecer um tempo médio considerando uma assíntota horizontal através do último ponto de medição de volume.

Com base nos resultados de condutividade hidráulica em função da sucção apresentados, nota-se que os pontos de $K(\psi)$ obtidos através das diferentes avaliações da relação volume-tempo não apresentaram grandes variações, mantendo-se sempre na mesma ordem de grandeza.

Com relação à variação dos resultados em função da espessura do disco poroso utilizado, nota-se que os valores advindos da análise das amostras sobre discos de 13 mm e de 24 mm são complementares em virtude das diferentes sucções impostas a cada amostra. A tendência das amostras sobre discos mais espessos apresentarem valores de condutividade hidráulica mais altos, identificada por Sterck (2011), pode ser notada para o solo siltoso 2 e para o solo siltoso 1, sendo mais proeminente para valores de sucção mais elevados.

A Figura 4.13 e a Figura 4.14 apresentam a comparação entre os resultados experimentais e as curvas do modelo de Mualem-van Genuchten, considerando os parâmetros da curva de retenção de umidade obtidos através

do método do papel filtro e em centrífuga, para os solos finos 1 e 2, respectivamente.

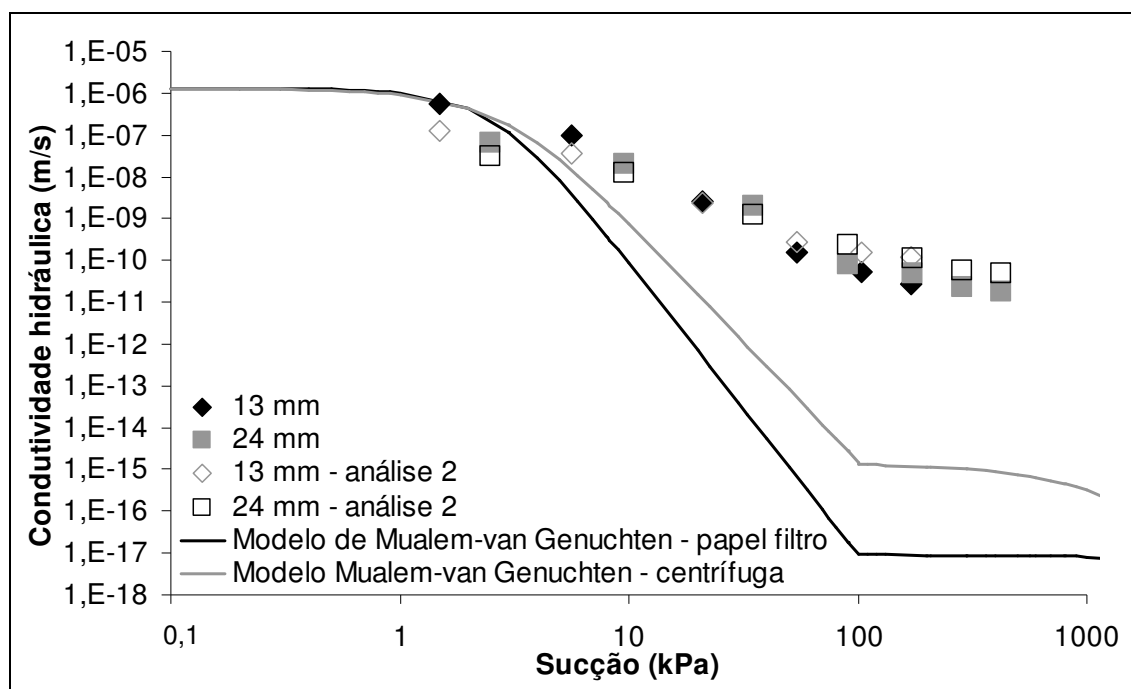


FIGURA 4.13 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E MODELO DE MUALEM-VAN GENUCHTEN PARA O SOLO SILTOSO 1.

Para o solo siltoso 1, as curvas do modelo e Mualem-van Genuchten se aproximaram dos dados experimentais na porção inicial da curva, para valores mais altos de condutividade hidráulica, medidos para as duas primeiras velocidade de rotação da centrífuga (300 e 500 rpm). Para sucções mais altas houve um distanciamento entre dados experimentais e modelo, sendo que os dados experimentais apresentaram valores de condutividade hidráulica acima do previsto pelo modelo. Esta tendência do modelo de Mualem-van Genuchten em subestimar os dados experimentais obtidos em centrífuga foi previamente reportada por Dell'Avanzi (2006), McCartney e Zornberg (2010) e Sterck (2011).

Nota-se também que, para o solo siltoso 1, a tendência de decaimento da curva do modelo, no intervalo de sucção de 4 a 100 kPa, é maior do que a tendência indicada pelos resultados experimentais, para os quais o decaimento apresenta-se de forma mais suave.

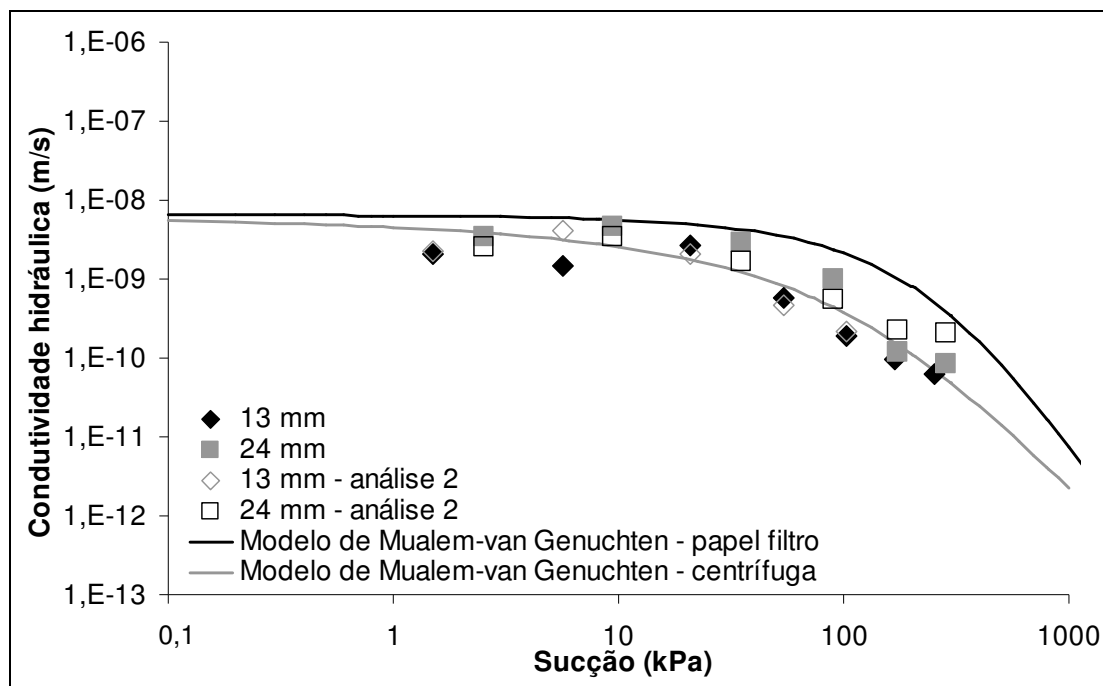


FIGURA 4.14 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E MODELO DE MUALEM-VAN GENUCHTEN PARA O SOLO SILTOSO 2.

Considerando os resultados para o solo siltoso 2 (Figura 4.14) verifica-se que os dados experimentais, para todo o intervalo de sucção, ficaram muito próximos das curvas do modelo de Mualem-van Genuchten, sendo a maior proximidade à curva prevista com base nos dados de CRUS obtidos em centrífuga. Para este solo, a tendência de decaimento da condutividade hidráulica com o aumento da sucção apresentou comportamento semelhante quando comparado dados experimentais e modelo.

A Figura 4.15 e a Figura 4.16 indicam a comparação dos resultados experimentais com as curvas obtidas por meio do modelo de Gardner.

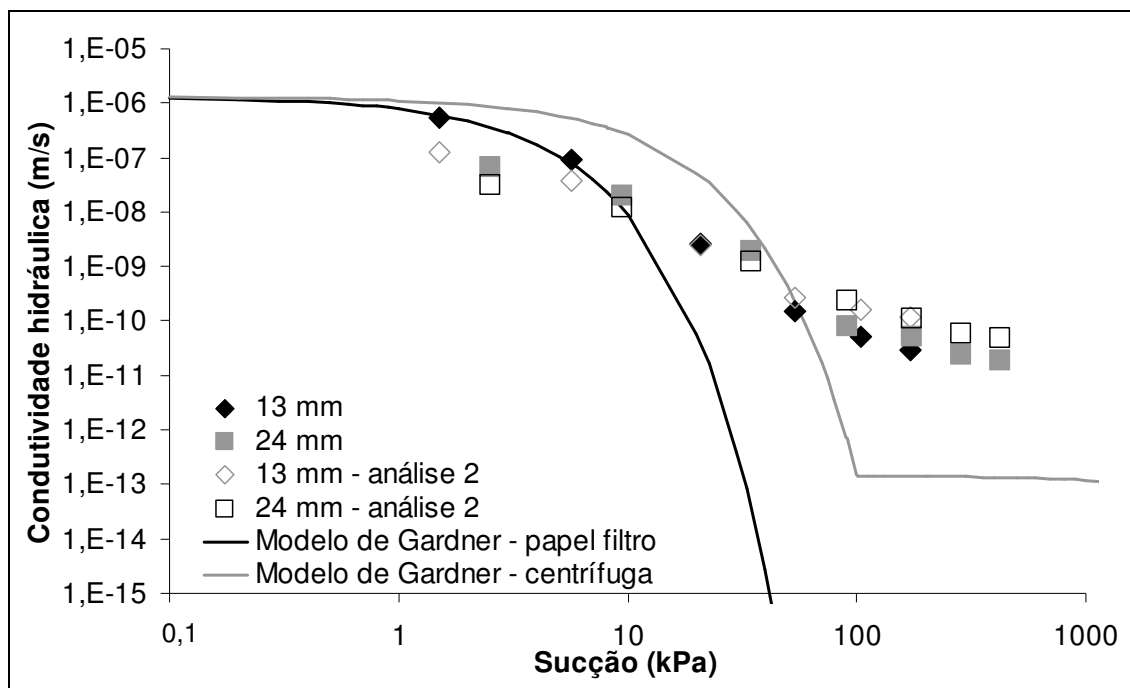


FIGURA 4.15 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E MODELO DE GARDNER PARA O SOLO SILTOSO 1.

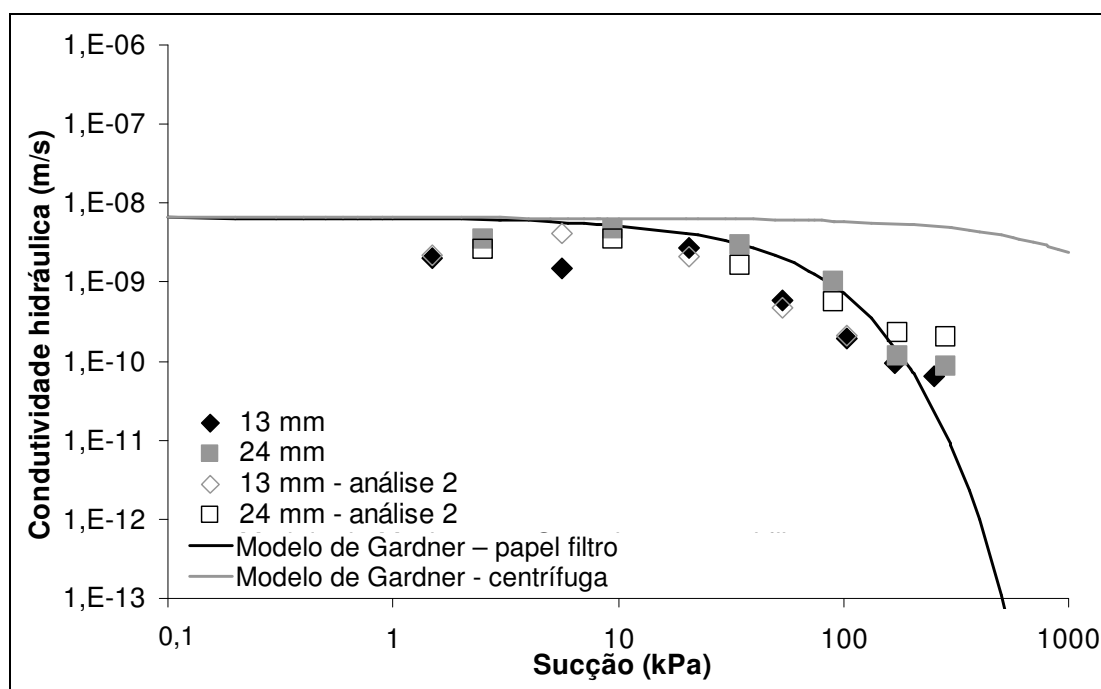


FIGURA 4.16 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E MODELO DE GARDNER PARA O SOLO SILTOSO 2.

O modelo de Gardner também apresentou boa concordância com os dados experimentais de centrífuga. Os valores experimentais ficaram abaixo

das curvas para o solo siltoso 2 e solo siltoso 1, quando comparado com a curva obtida através de parâmetros do ensaio em centrífuga.

A Figura 4.17 apresenta os resultados para ambos os solos plotados em um mesmo gráfico a fim de permitir uma comparação entre os resultados.

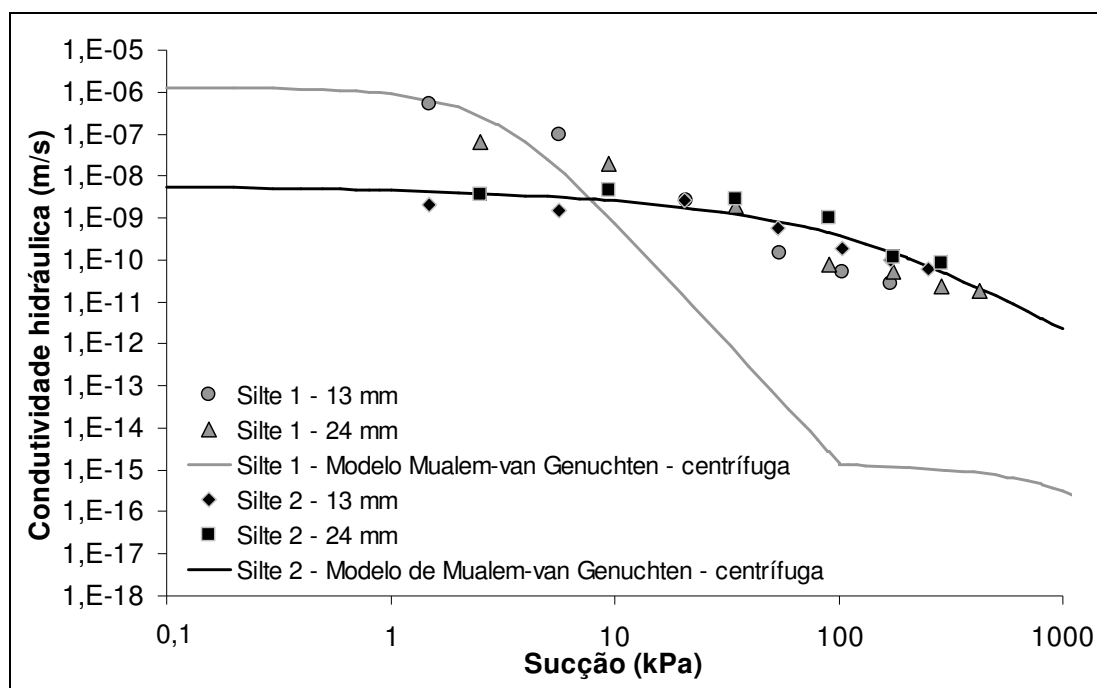


FIGURA 4.17 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA PARA OS DOIS SOLOS FINOS.

O solo siltoso 2 tem como característica a menor permeabilidade até valores de sucção de cerca de 50 kPa (conforme dados experimentais, e de 10 kPa conforme modelo de Mualem-van Genuchten) e o menor decaimento nos valores da condutividade na medida em que a sucção aumenta (decaimento mais suave da curva). O solo siltoso 1 apresenta valores de permeabilidade saturada de duas ordens de grandeza maiores do que os do solo siltoso 2, no entanto, a Função-K decresce mais ligeiramente com o acréscimo na sucção fazendo com que a curva e os pontos experimentais fiquem abaixo dos valores obtidos para o solo siltoso 2 para sucções mais altas.

Ao final do ensaio em centrífuga, após o estágio de rotação de 3000 rpm, a altura final das amostras foi medida a fim de verificar possíveis deformações verticais. A variação de altura das amostras foi menor do que 0,5 mm para todas as amostras de solo. Estas variações correspondem em volume a

deformações de menos de 2,5%. Como as deformações não foram significativas considerou-se que a densidade e o índice de vazios do solo permaneceram praticamente constantes durante os ensaios. Sendo assim, o valor de densidade calculado inicialmente para cada amostra de solo foi utilizado para determinação da umidade volumétrica a cada parada da centrífuga.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM PERMEÂMETRO COM APLICAÇÃO DE PRESSÃO DE AR

Considerando o grande volume de valores de umidade volumétrica e sucção gerados através dos ensaios em permeâmetro, existem diversas formas de analisar estes dados a fim de obter a Função-K do solo. Conforme indicado no Capítulo 3, foram utilizadas duas equações principais para obtenção da condutividade hidráulica: a lei de Darcy (Equação 3.16) e a equação de Richards (Equação 3.25). Ainda, avaliando as variáveis inseridas em cada uma das equações surgem diferentes formas de contabilização destas, assumindo as hipóteses já indicadas no item 3.3.3.

A condutividade hidráulica não saturada foi determinada para cada caso com o intuito de avaliar a influência de cada hipótese de cálculo adotada. A fim de facilitar a apresentação e entendimentos dos resultados, foram elaborados os quadros a seguir com a síntese das hipóteses consideradas para estimativa de $K(\psi)$.

QUADRO 4.1 – ANÁLISE DOS DADOS ATRAVÉS DA LEI DE DARCY.

Análise dos dados pela Lei de Darcy	$K(\psi) = - \frac{\bar{v}}{\left[1 + \frac{1}{\rho_w g} \left(\frac{\partial u_a}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right]}$				
	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial z}_{\text{inicial}} + \frac{\partial \psi}{\partial z}_{\text{final}} \right) / 2$		$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\sum_1^n \frac{\partial \psi}{\partial z}}{n}$		$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0$
	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\psi_{s1} - \psi_{s4}}{15}$	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\psi_{s1}}{17,5}$	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\psi_{s1} - \psi_{s4}}{15}$	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\psi_{s1}}{17,5}$	
$\frac{\partial u_a}{\partial z} = 0$	K_{D1}	K_{D2}	K_{D3}	K_{D4}	K_{D5}

QUADRO 4.2 - ANÁLISE DOS DADOS ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE RICHARDS.

Análise dos dados pela Equação de Richards	$K(\psi) = - \frac{\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\left. \frac{\partial h}{\partial z} \right _z} = \frac{\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\left[1 + \frac{1}{\rho_w g} \left. \frac{\partial u_a}{\partial z} \right _z - \frac{1}{\rho_w g} \left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right _z \right]}$	
	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\psi_{(z_2)} - \psi_{(z_1)}}{z_2 - z_1}$	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0$
$\frac{\partial u_a}{\partial z} = 0$	K_{R1}	K_{R2}

Para avaliação da condutividade hidráulica por meio da Lei de Darcy o volume de fluxo de saída deve ser medido ao longo do tempo permitindo a identificação do tempo de equilíbrio, momento em que é feito o incremento de pressão de ar. Os valores de volume de fluxo de saída ao longo do tempo para ensaio com areia são apresentados na Figura 4.18. Na Figura 4.19 apresenta-se os dados para silte 1, e na Figura 4.20, para silte 2.

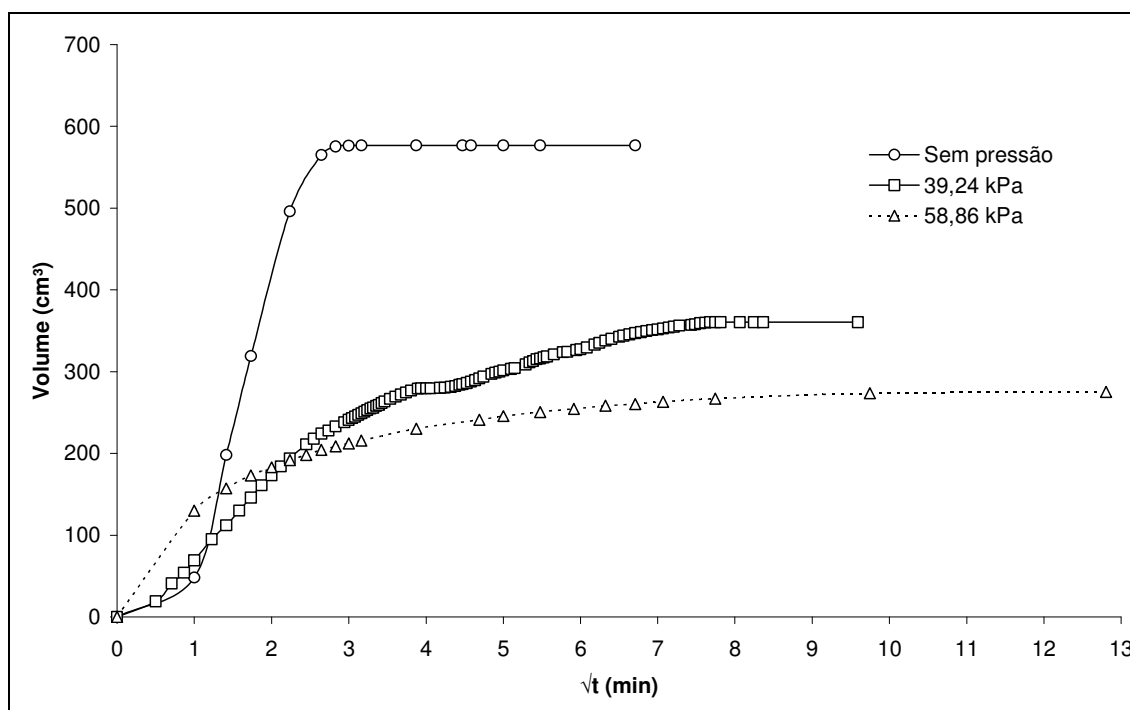


FIGURA 4.18 – VARIAÇÃO DO VOLUME ACUMULADO DE FLUXO DE SAÍDA DURANTE ENSAIO COM AREIA.

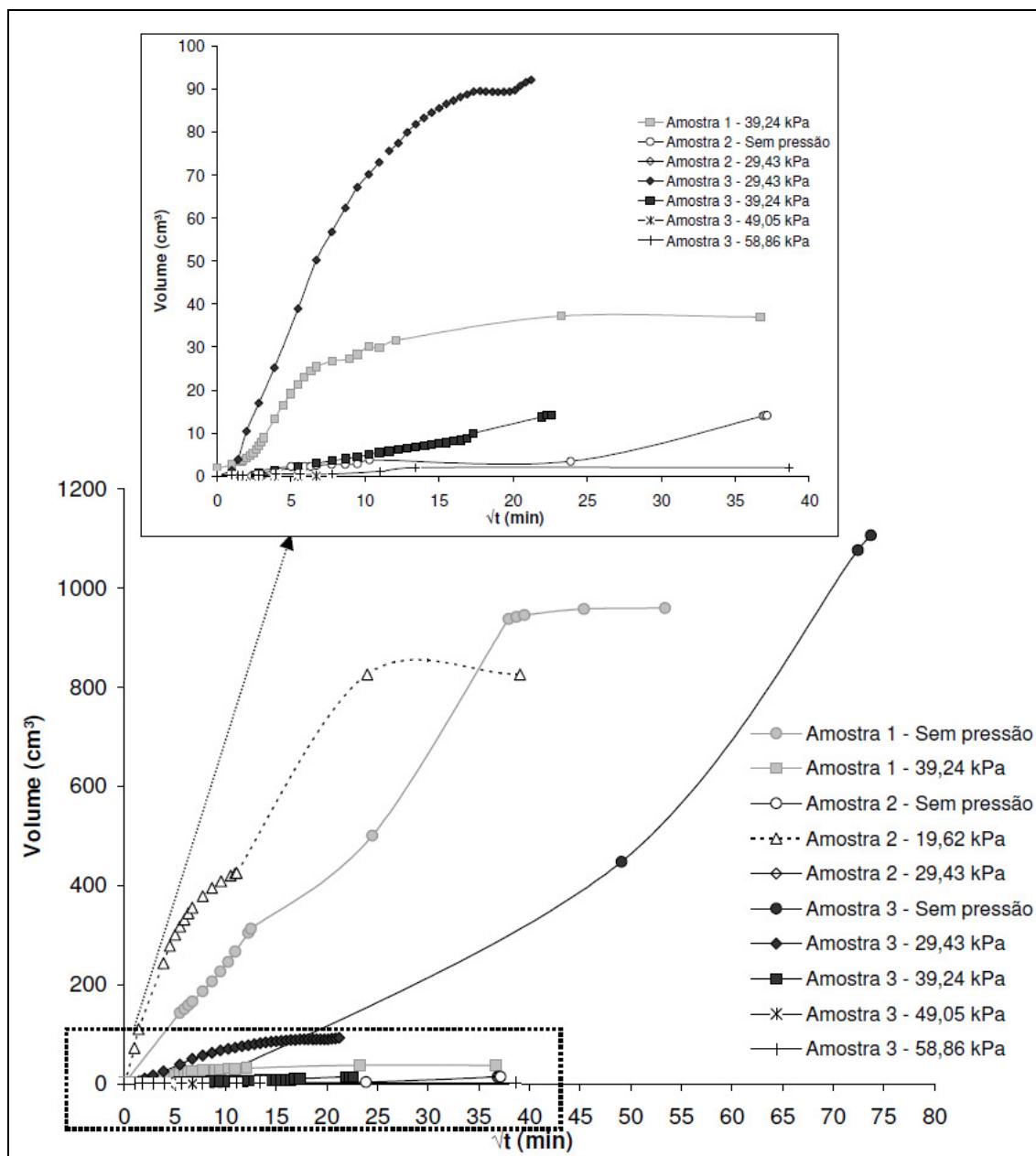


FIGURA 4.19 – VARIAÇÃO DO VOLUME ACUMULADO DE FLUXO DE SAÍDA DURANTE ENSAIO COM SILTE 1.

O comportamento padrão apresentado para a areia e para o silte 1 foi de decréscimo do volume acumulado de fluxo de saída com a aplicação de pressão.

O volume de fluxo de saída depende da quantidade de água adicionada para saturação do solo. Para cada uma das três amostras do solo siltoso 1 avaliadas, o volume inicial de água adicionado ao solo foi diferente em vista das características das amostras e da condição utilizada para saturação.

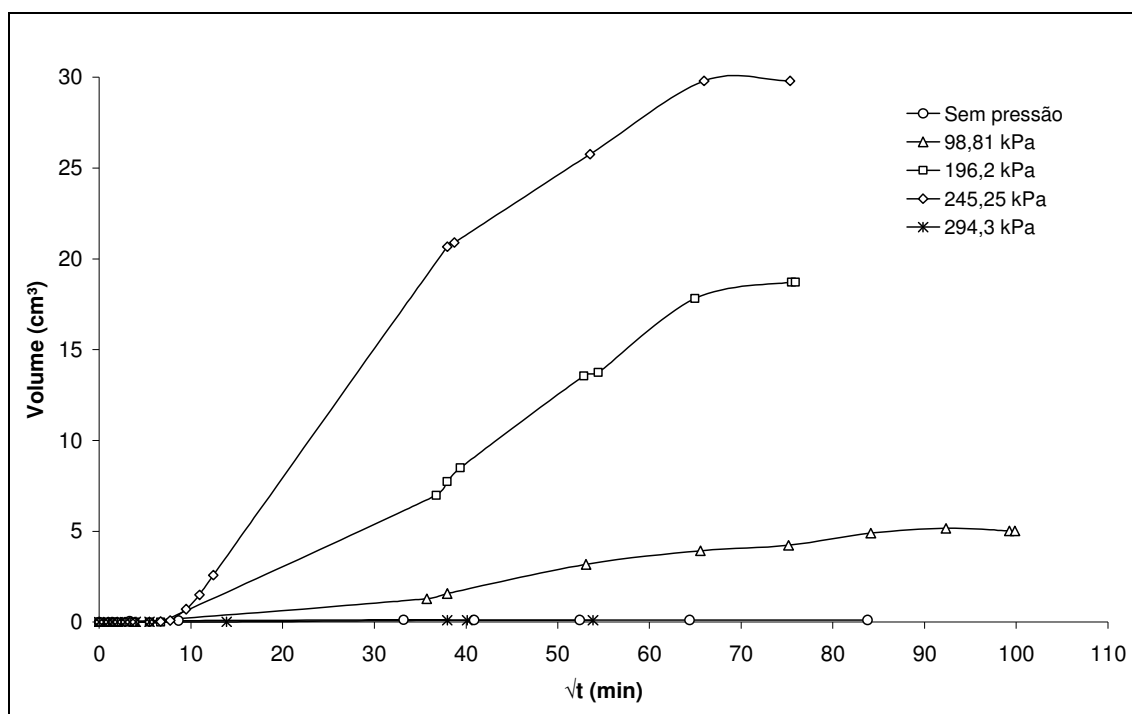


FIGURA 4.20 – VARIAÇÃO DO VOLUME ACUMULADO DE FLUXO DE SAÍDA DURANTE ENSAIO COM SILTE 2.

A quantidade de água requerida para saturação foi calculada com base nas características de umidade e peso específico da amostra de solo. A água destilada foi inserida ao topo do solo inicialmente. Após infiltração e manutenção do nível d'água na base do permeâmetro ($z=0$) aplicou-se pressão de ar ao reservatório inferior que havia recebido o fluxo de saída do solo e havia sido inteiramente preenchido com água. Dessa forma, a quantidade de água disponível para saturação do solo ficou um pouco acima do valor necessário à saturação. Esta situação e as diferenças de peso específico e umidade de compactação dão origem às diferenças entre os valores de volume de água de fluxo de saída durante os estágios de pressão para as amostras 1 e 3.

No entanto, verifica-se que os volumes de fluxo de saída para a amostra 2 apresentaram comportamento distinto das demais amostras de silte 1. Para esta amostra, o volume de água de fluxo de saída no estágio de ensaio sem pressão foi muito menor do que o volume para o primeiro estágio de pressão (19,62 kPa). Estas inconsistências podem ser atribuídas a problemas com a pressurização aplicada ao solo levando à criação de caminhos preferenciais de fluxo. Os altos valores de volume de fluxo de saída medidos são reproduzidos

nos valores de condutividade hidráulica menores para ensaio sem pressão do que para ensaio com pressurização. Em vista dos resultados fora do padrão apresentado pelas outras duas amostras testadas, verificou-se a necessidade de desconsiderar os dados gerados por meio da amostra número 2 de solo siltoso 1.

No caso do solo siltoso 2 o comportamento foi oposto ao apresentado pelos demais solos testados: o volume de fluxo de saída aumentou com o acréscimo da pressão aplicada, com exceção do último estágio de pressão para o qual o solo já estava praticamente seco. Este comportamento é característico dos solos mais finos e menos permeáveis nos quais a força necessária (aplicada através da pressurização) para superação da capilaridade deve ser maior.

Na equação de Richards a razão entre volume de água e tempo está embutida no termo $\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz$, calculado para cada passo de tempo do ensaio e para cada profundidade, gerando com isso uma maior quantidade de valores de $K(\psi)$.

As variações de umidade volumétrica ao longo dos ensaios foram determinadas com base nas leituras das sondas de TDR e curvas de calibração das mesmas, descritas pelas Equações 3.8, 3.10 e 3.13, para areia, silte 1 e silte 2, respectivamente. A Figura 4.21 indica a série temporal de umidade volumétrica na amostra de areia. A mesma informação é apresentada para o silte 1 e 2 na Figura 4.22 e Figura 4.23, respectivamente.

A variação da umidade volumétrica em relação ao tempo e estágio de ensaio também pode ser avaliada através de isócronas de umidade em relação ao tempo (perfil de umidade). A Figura 4.24 indica os perfis de umidade para o solo arenoso. O mesmo é indicado na Figura 4.25 e Figura 4.26, para os solos siltoso 1 e 2, respectivamente.

Na base do permeâmetro considerou-se sempre o estado saturado do solo ($\theta = n$, em $z = 0$).

As umidades volumétricas no topo da coluna de solo ao final de cada estágio de pressurização, considerando também o estágio sem pressão de ar são apresentadas na Tabela 4.4, para a areia e o silte 1, e na Tabela 4.5, para o silte 2.

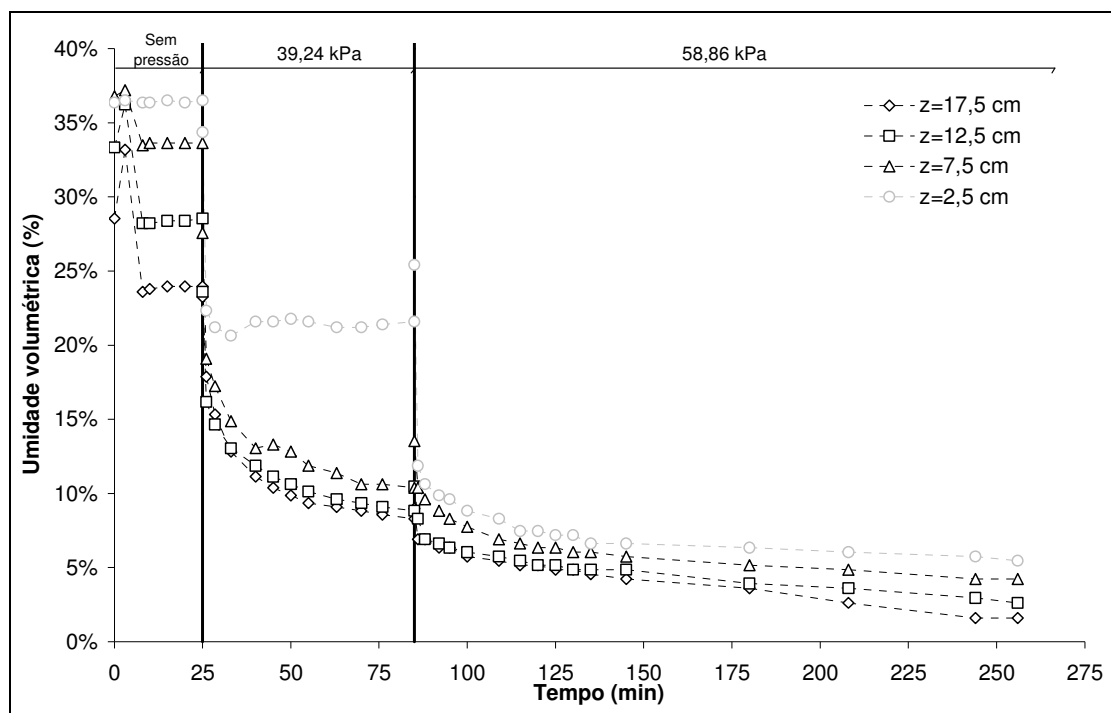
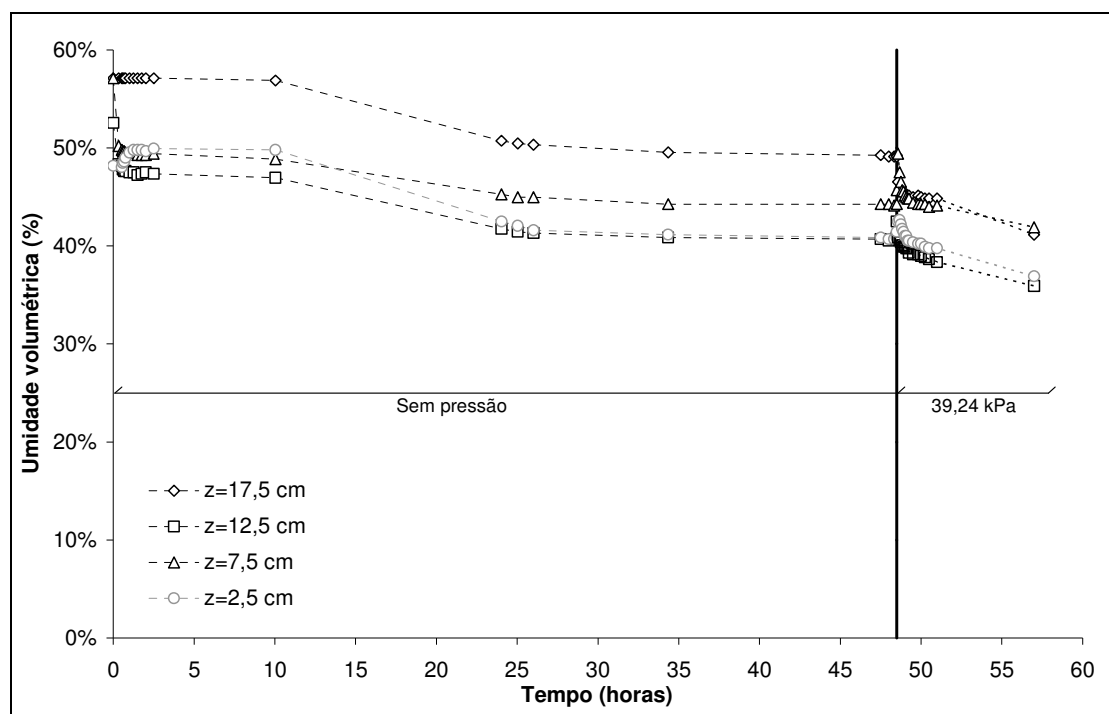
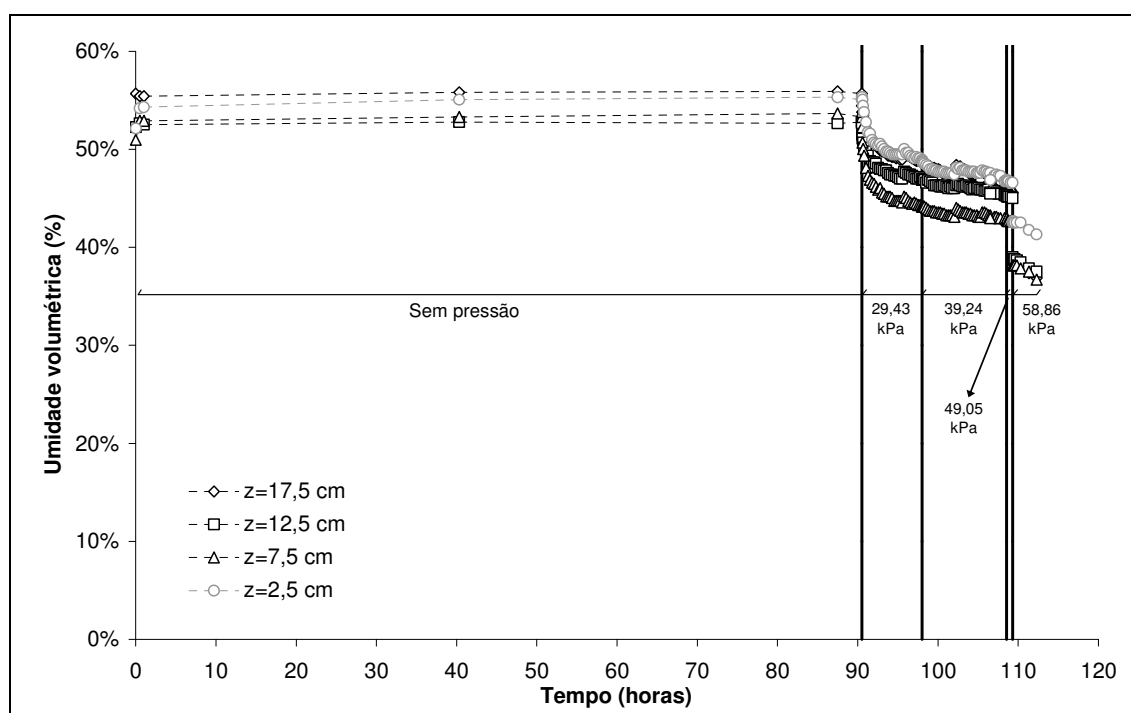


FIGURA 4.21 – SÉRIE TEMPORAL DE UMIDADE VOLUMÉTRICA PARA ENSAIO COM AREIA.



(a)



(b)

FIGURA 4.22 – SÉRIE TEMPORAL DE UMIDADE VOLUMÉTRICA PARA ENSAIO COM SILTE 1: (a) AMOSTRA 1 E (b) AMOSTRA 3.

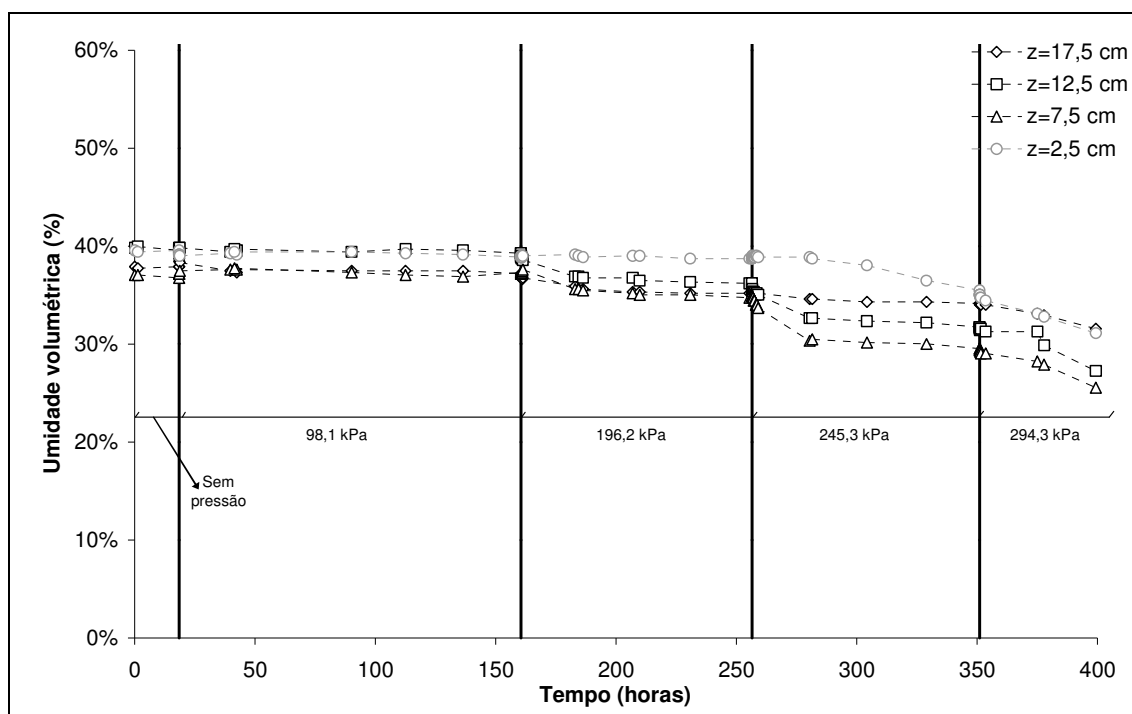


FIGURA 4.23 – SÉRIE TEMPORAL DE UMIDADE VOLUMÉTRICA PARA ENSAIO COM SILTE 2.

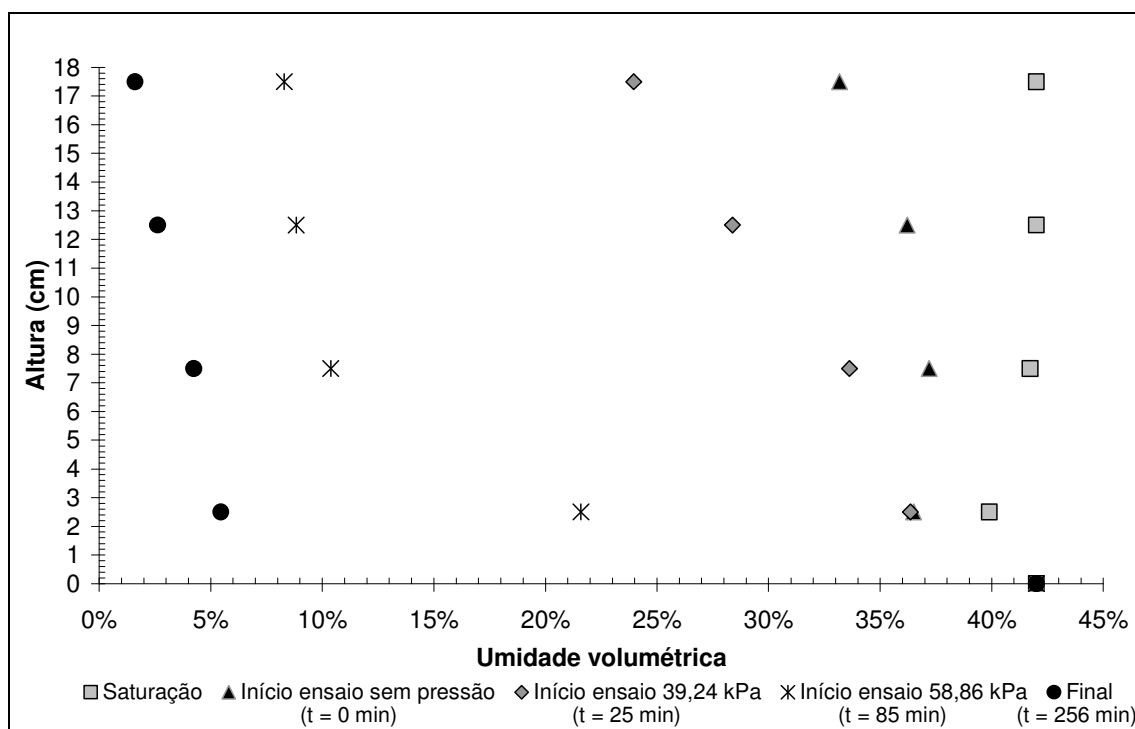
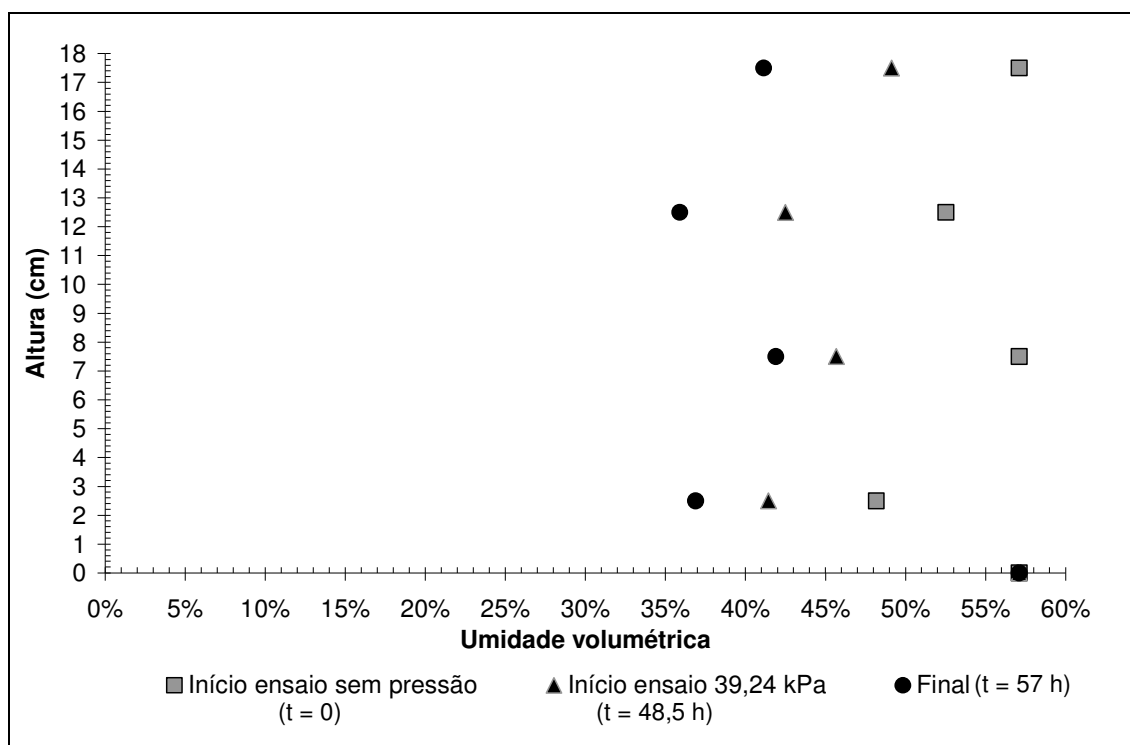
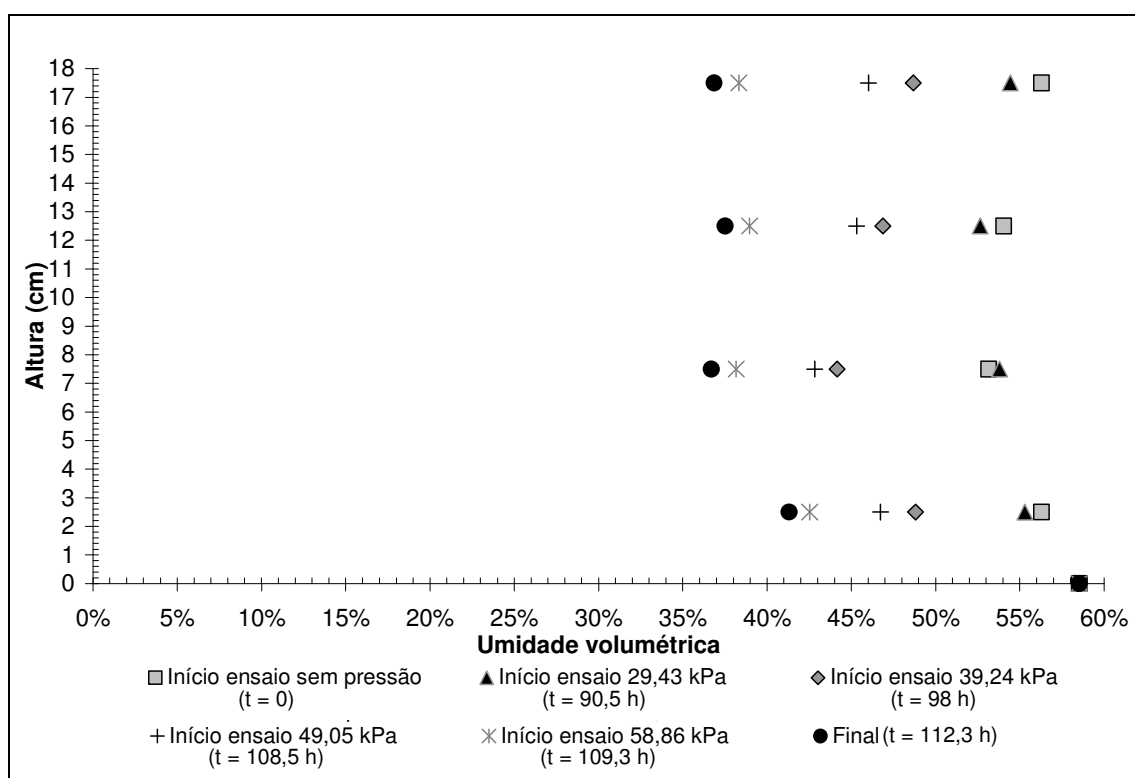


FIGURA 4.24 – VARIAÇÃO DO PERFIL DE UMIDADE VOLUMÉTRICA COM O TEMPO E ESTÁGIO PARA ENSAIO COM AREIA.



(a)



(b)

FIGURA 4.25 – VARIAÇÃO DO PERFIL DE UMIDADE VOLUMÉTRICA COM O TEMPO E ESTÁGIO PARA ENSAIO COM SOLO SILTOSO 1: (a) AMOSTRA 1 E (b) AMOSTRA 3.

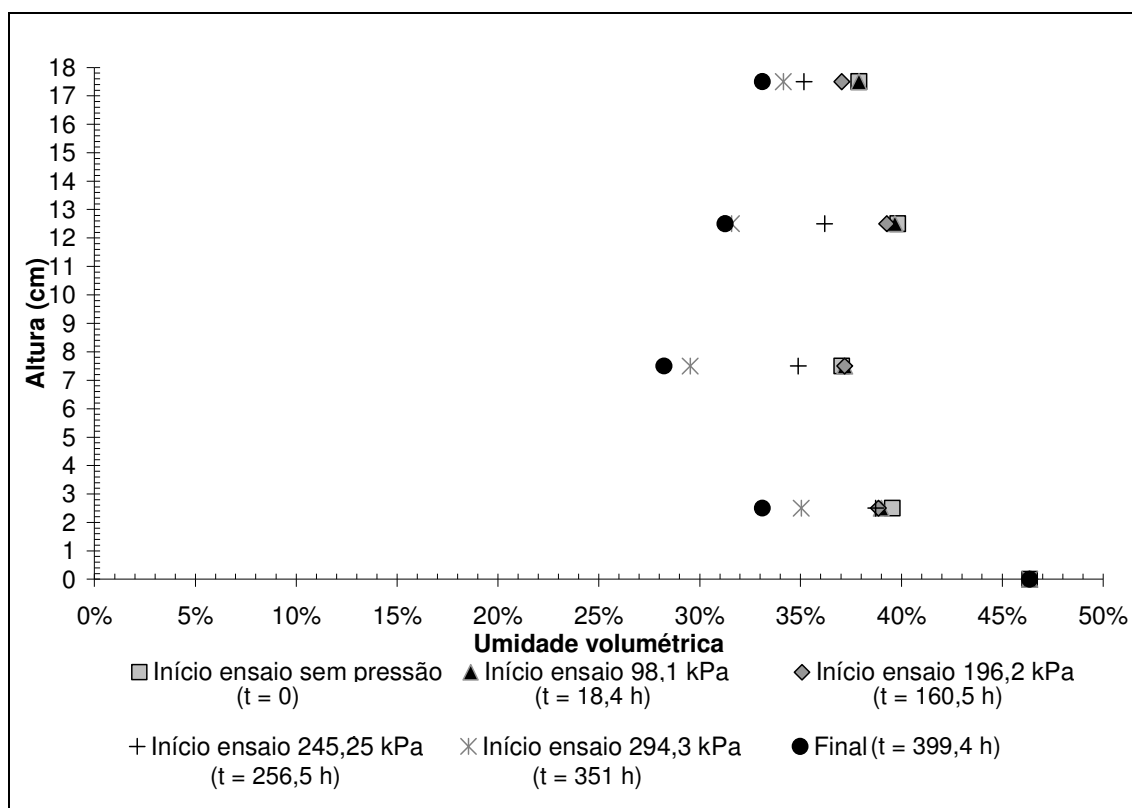


FIGURA 4.26 – VARIAÇÃO DO PERFIL DE UMIDADE VOLUMÉTRICA COM O TEMPO E ESTÁGIO PARA ENSAIO COM SOLO SILTOSO 2.

TABELA 4.4 – UMIDADES VOLUMÉTRICAS NO TOPO DA COLUNA DE SOLO AO FINAL DE CADA ESTÁGIO DE PRESSURIZAÇÃO PARA AREIA E SILTE 1.

Pressão de ar (kPa)	Umidade volumétrica		
	Areia	Silte 1	
		Amostra 1	Amostra 3
0	23,96%	49,13%	54,43%
29,43	-	-	48,67%
39,24	8,29%	41,14	46,03%
49,05	-	-	38,33%
58,86	1,61%	-	36,86%

TABELA 4.5 – UMIDADES VOLUMÉTRICAS NO TOPO DA COLUNA DE SOLO AO FINAL DE CADA ESTÁGIO DE PRESSURIZAÇÃO PARA SILTE 2.

Pressão de ar (kPa)	Umidade volumétrica
	Silte 2
0	37,89%
98,1	39,27%
196,2	35,18%
245,25	34,15%
294,3	33,10%

Para o solo arenoso identifica-se a drenagem mais rápida da amostra atingindo valores de umidade volumétrica residual. Já para os solos mais finos, a drenagem é mais lenta e as umidades volumétricas ao final dos ensaios com pressurização se mantêm altas. Conforme a CRUS dos solos finos (Figuras 3.17 e 3.27) apenas para sucções acima de 10.000 kPa a umidade atinge valores residuais. As sucções máximas atingidas no ensaio com pressurização de ar foram de cerca de 70 kPa, para o solo siltoso 1, e de 700 kPa, para o solo siltoso 2, mantendo a umidade volumétrica superior a 30% em ambos os casos. Considerando a relação entre altura capilar e tamanho da amostra do solo verifica-se que a amostra se mantém em uma região antes do valor de entrada de ar no solo, o que explica as altas umidades ao final do ensaio.

As séries de sucção em relação ao tempo, profundidade e pressão de ar aplicada foram estimadas com base nos dados de umidade volumétrica, na CRUS dos solos (obtidas por meio de ensaio de coluna drenante, para o solo grosso, e por meio do método de papel filtro, para os solos finos) e na pressão de ar aplicada ao topo da amostra. A variação da sucção ao longo do tempo é apresentada na Figura 4.27, para a areia, na Figura 4.28, para o silte 1 e na Figura 4.29, para o silte 2.

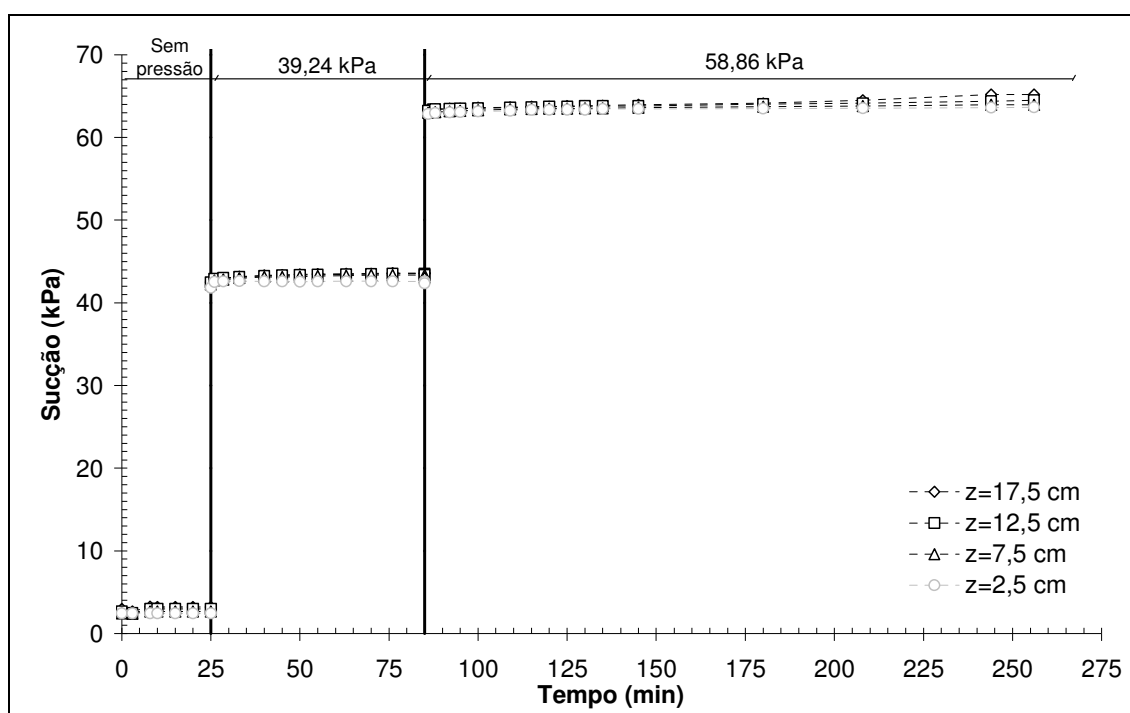
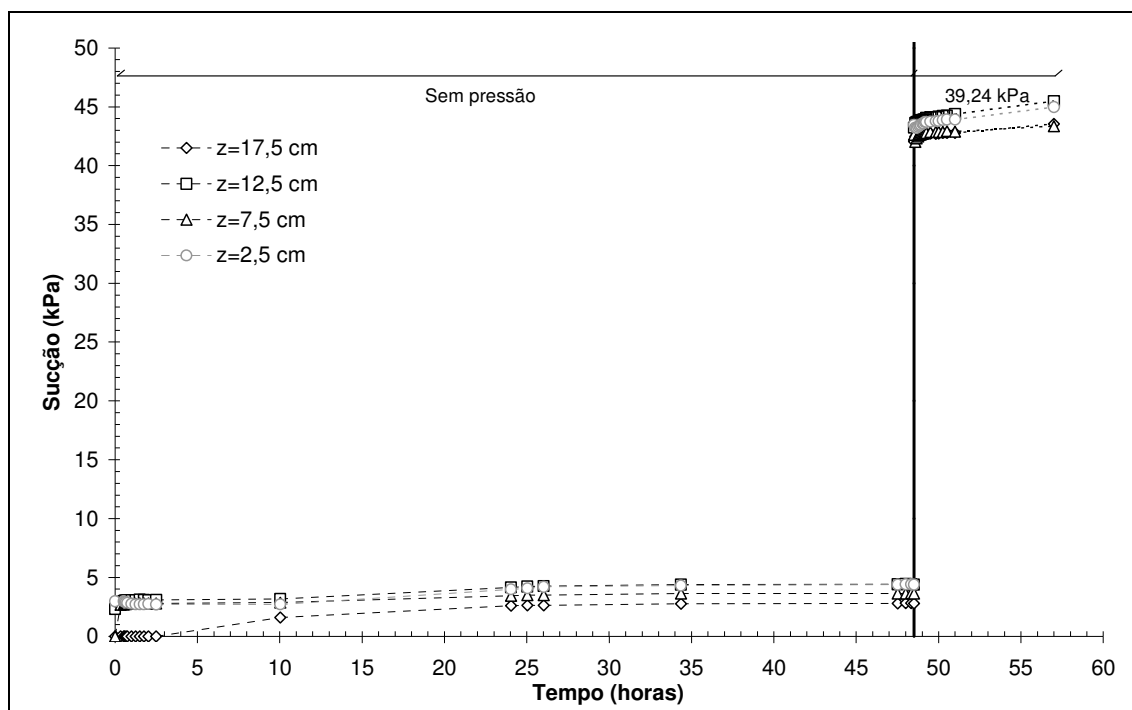
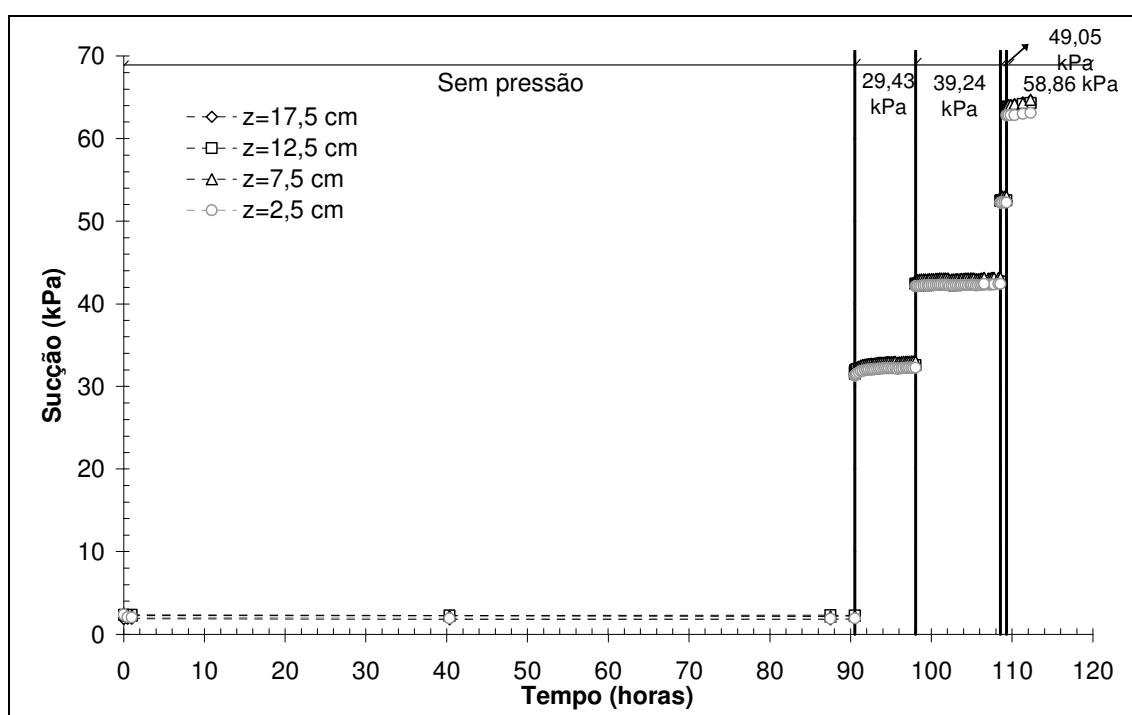


FIGURA 4.27 – SÉRIE TEMPORAL DE SUCÇÃO PARA ENSAIO COM AREIA.



(a)



(b)

FIGURA 4.28 – SÉRIE TEMPORAL DE SUCÇÃO PARA ENSAIO COM SILTE 1: (a) AMOSTRA 1 E (b) AMOSTRA 3.

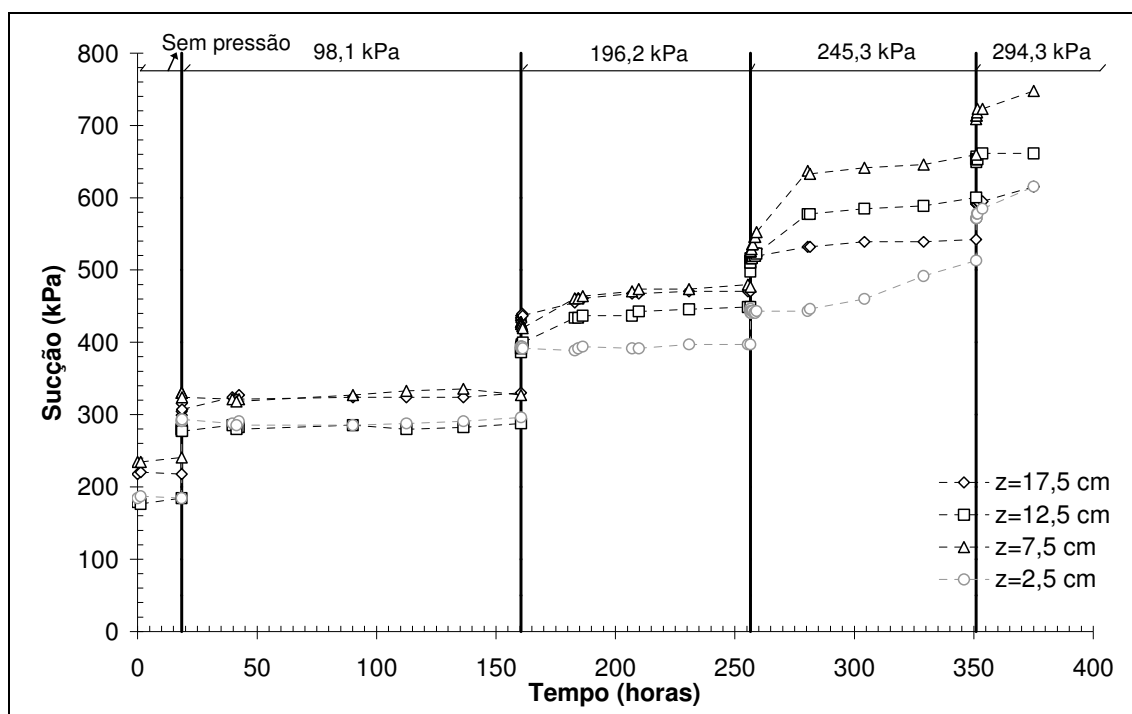
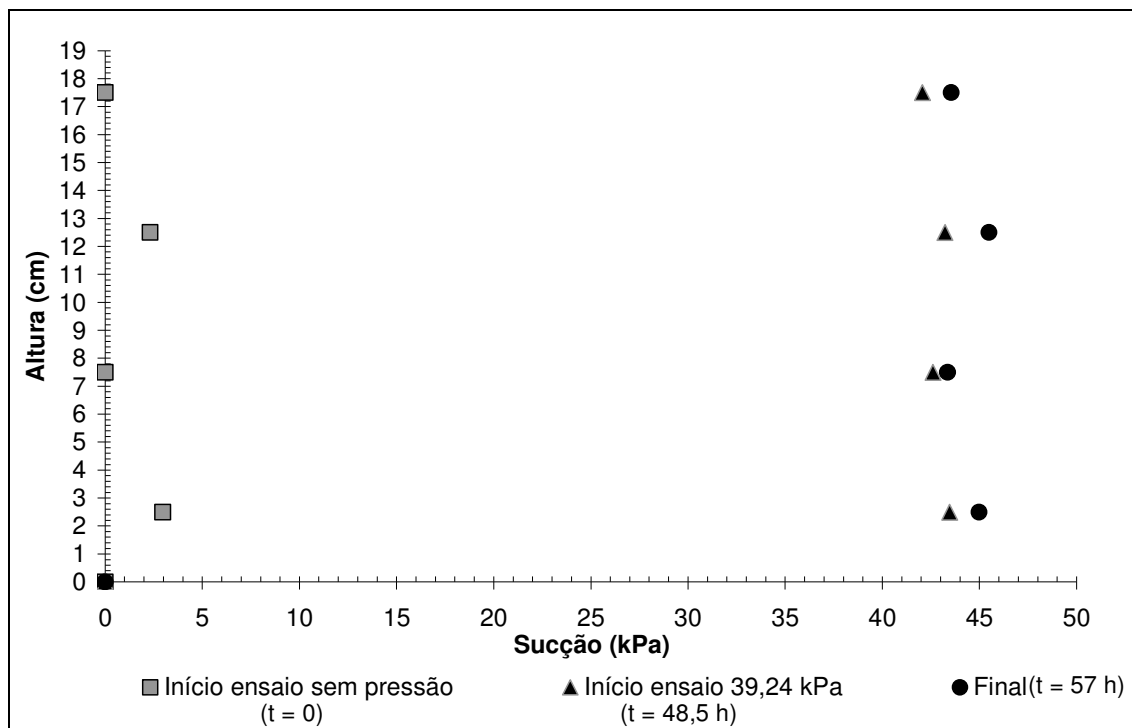
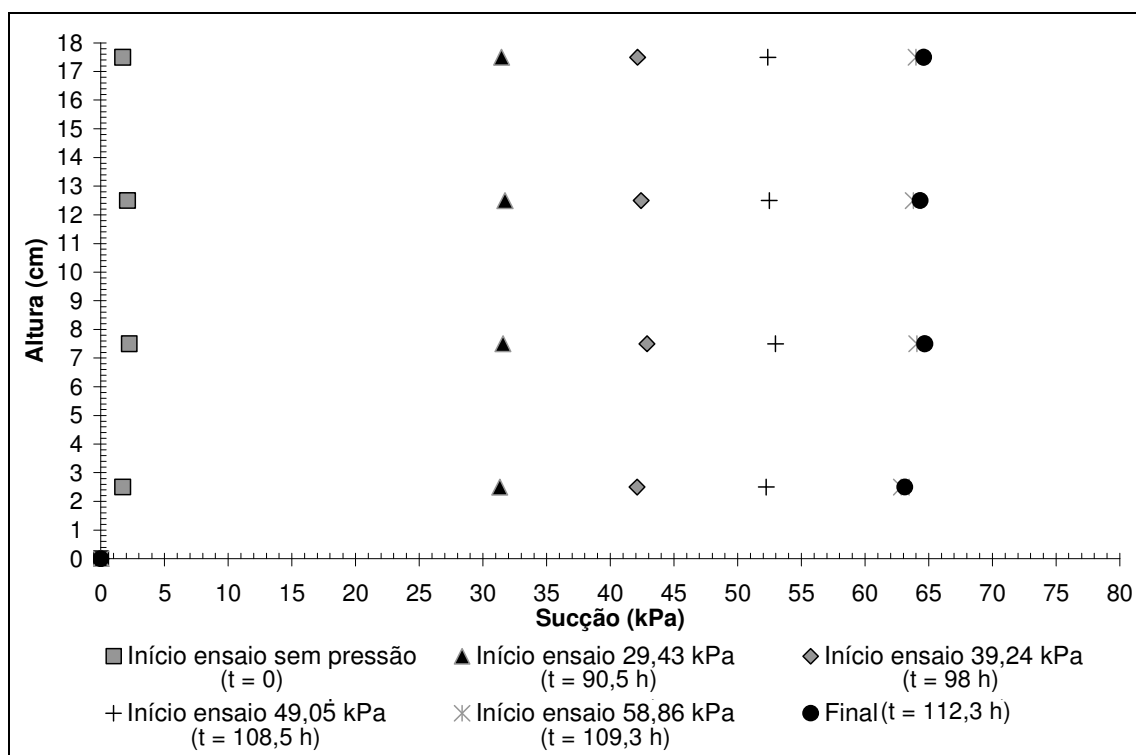


FIGURA 4.29 – SÉRIE TEMPORAL DE SUCÇÃO PARA ENSAIO COM SILTE 2.

Da mesma forma que para a umidade volumétrica, a variação da sucção em relação ao tempo e estágio de ensaio também pode ser avaliada através das isócronas de sucção. A Figura 4.31 indica estes perfis para o solo siltoso 1. O mesmo é indicado na Figura 4.30 e Figura 4.32, para os solos arenoso e siltoso 2, respectivamente. Na base do permeâmetro considerou-se a condição saturada, na qual $\psi = 0$.



(a)



(b)

FIGURA 4.30 – VARIAÇÃO DO PERFIL DE SUCÇÃO COM O TEMPO E ESTÁGIO PARA ENSAIO COM SOLO SILTOSO 1: (a) AMOSTRA 1 E (b) AMOSTRA 3.

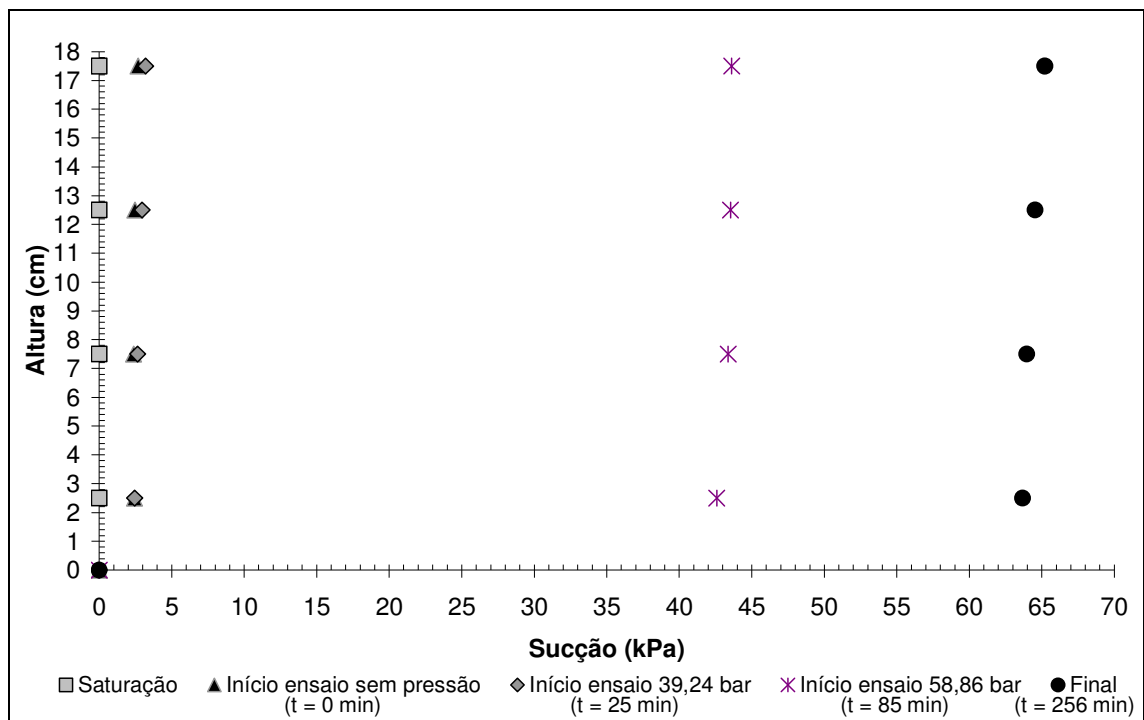


FIGURA 4.31 – VARIAÇÃO DO PERFIL DE SUCÇÃO COM O TEMPO E ESTÁGIO PARA ENSAIO COM AREIA.

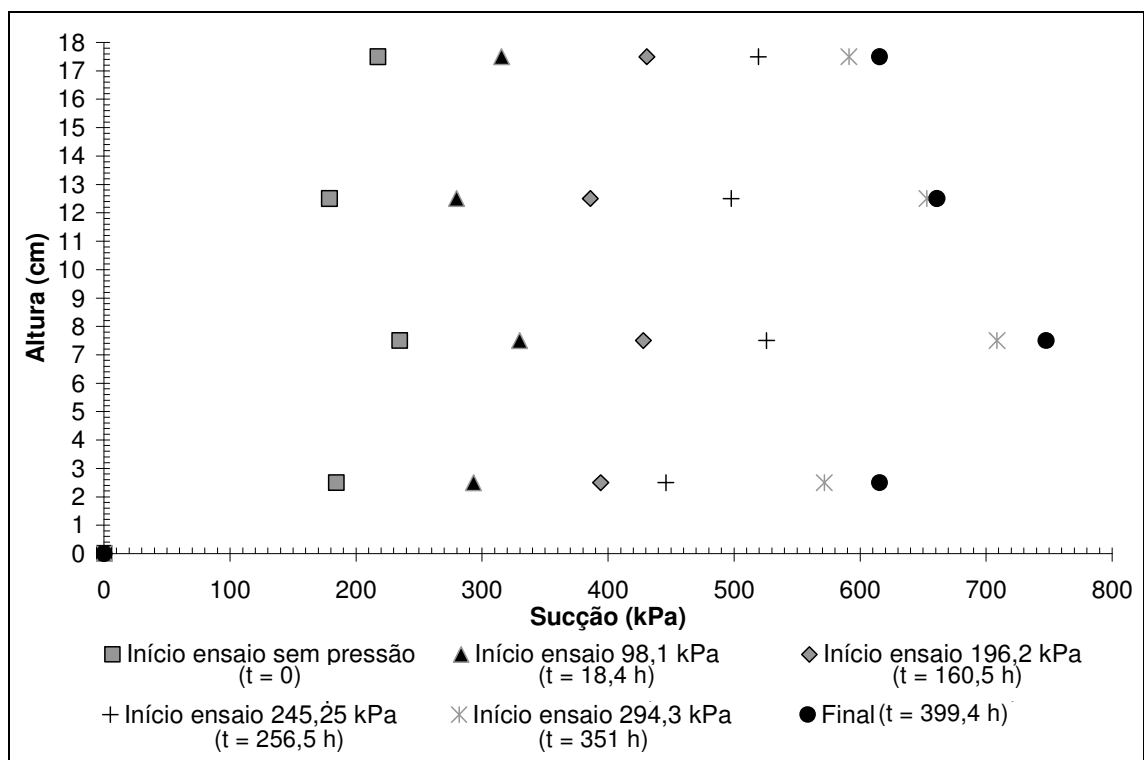


FIGURA 4.32 – VARIAÇÃO DO PERFIL DE SUCÇÃO COM O TEMPO E ESTÁGIO PARA ENSAIO COM SOLO SILTOSO 2.

Os perfis de umidade e sucção ao longo do tempo indicam que a aproximação de gradiente de sucção nulo na porção superior da coluna de solo é válida. Para ensaio sem pressurização essa hipótese leva diretamente à simplificação de gradiente hidráulico unitário na lei de Darcy e equação de Richards.

Para ensaio com pressurização de ar, o gradiente hidráulico apresenta o termo relativo à pressão de ar, que *a priori* deve ser considerado na análise. A pressão do ar é conhecida apenas no topo (pressão aplicada) e na base (pressão atmosférica – nula) da coluna de solo, mas a forma como varia entre estes limites não o é. A melhor estimativa considera a hipótese de que o comportamento do gradiente de pressão de ar fica próximo de zero ao longo da porção superior da amostra e apresenta uma redução abrupta para zero na abertura para atmosfera (em $z=0$). Dessa forma, também para ensaios com pressurização pode-se considerar gradiente hidráulico unitário.

Os dados apresentados de pressão de ar, umidade volumétrica, sucção e volume de fluxo de saída foram utilizados para obtenção da Função-K através das Equações 3.16 e 3.25, utilizando as hipóteses indicadas nos Quadros 4.1 e 4.2, respectivamente.

A Tabela 4.6 e a Tabela 4.7 indicam os valores de condutividade hidráulica não saturada obtidos para o solo arenoso através da lei de Darcy e equação de Richards, respectivamente. A Figura 4.33 apresenta os dados experimentais plotados juntamente com as curvas dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner.

TABELA 4.6 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ENSAIO EM PERMEÂMETRO PARA AREIA COM ANÁLISE ATRAVÉS DA LEI DE DARCY.

Pressão aplicada (kPa)	Sucção média no centro (kPa)	Condutividade hidráulica (m/s) - Lei de Darcy				
		K_{D1}	K_{D2}	K_{D3}	K_{D4}	K_{D5}
0	2,61	$1,23 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-4}$
39,24	23,14	$3,17 \times 10^{-5}$	$3,21 \times 10^{-5}$	$3,17 \times 10^{-5}$	$3,25 \times 10^{-5}$	$3,17 \times 10^{-5}$
58,86	53,85	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,89 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$1,89 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$

TABELA 4.7 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ENSAIO EM PERMEÂMETRO PARA AREIA COM ANÁLISE ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE RICHARDS.

Pressão de ar (kPa)	z (cm)	Sucção média (kPa)	Condutividade hidráulica (m/s) Equação de Richards	
			K_{R1}	K_{R2}
0	2,5	2,44	$1,18 \times 10^{-7}$	$1,17 \times 10^{-7}$
	7,5	2,58	$1,05 \times 10^{-6}$	$1,05 \times 10^{-6}$
	12,5	2,85	$1,60 \times 10^{-6}$	$1,60 \times 10^{-6}$
	17,5	3,10	$1,53 \times 10^{-6}$	$1,53 \times 10^{-6}$
39,24	2,5	42,53	$8,87 \times 10^{-7}$	$8,87 \times 10^{-7}$
	7,5	43,07	$2,39 \times 10^{-6}$	$2,39 \times 10^{-6}$
	12,5	43,24	$2,05 \times 10^{-6}$	$2,05 \times 10^{-6}$
	17,5	43,27	$2,08 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-6}$
58,86	2,5	62,09	$6,51 \times 10^{-7}$	$4,86 \times 10^{-7}$
	7,5	62,29	$4,53 \times 10^{-7}$	$4,53 \times 10^{-7}$
	12,5	62,58	$3,82 \times 10^{-7}$	$3,82 \times 10^{-7}$
	17,5	62,75	$3,59 \times 10^{-7}$	$3,59 \times 10^{-7}$

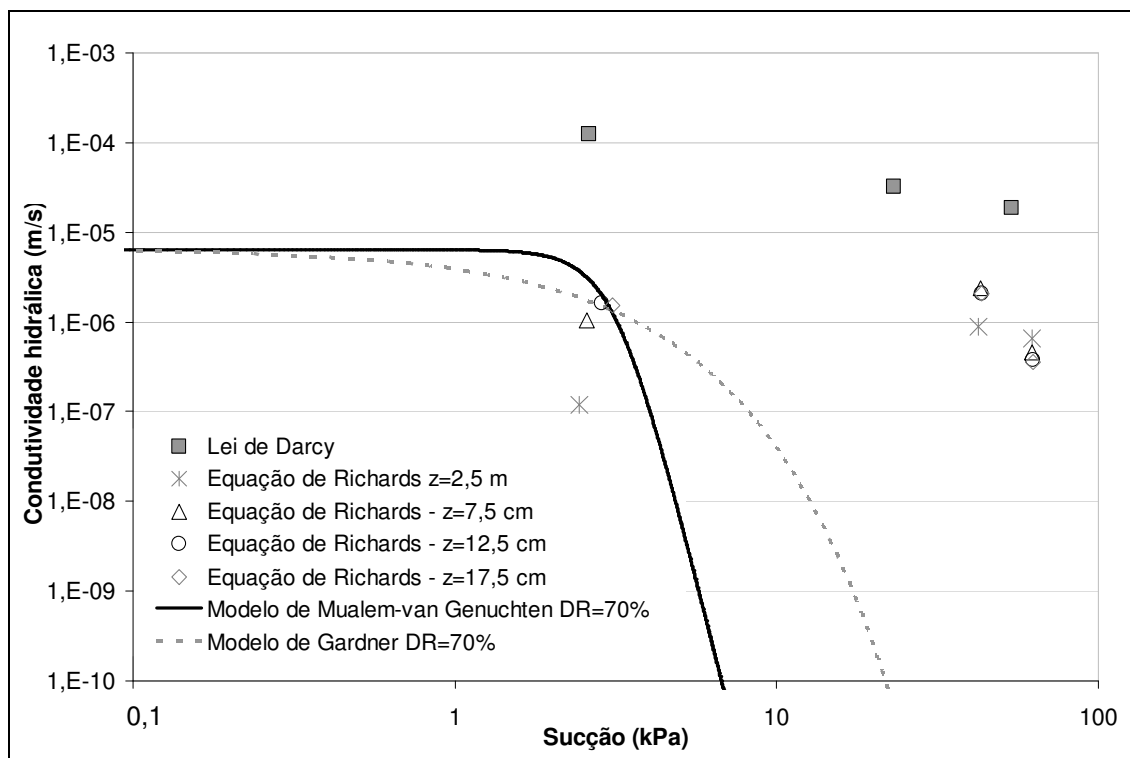


FIGURA 4.33 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE ENSAIOS EM PERMEÂMETRO COM PRESSURIZAÇÃO DE AR E CURVAS DOS MODELOS DE MUALEM-VAN GENUCHTEN E DE GARDNER PARA SOLO ARENOSO.

Os dados experimentais apresentados na Figura 4.33, para areia, indicam que a análise pela lei de Darcy, utilizando valores médios obtidos durante o ensaio e volume de fluxo de saída medido, retornou pares de

$K \times \psi$ com os valores de K reduzindo levemente com o aumento da sucção, conforme esperado. Já os pontos experimentais obtidos através da equação de Richards, os quais consideram a estimativa do fluxo de saída através da variação da umidade ao longo do tempo e sua relação ao longo da profundidade, apresentam valores de condutividade hidráulica mais reduzidos para o estágio de ensaio sem pressão do que para os ensaios com pressurização. A tendência de decréscimo de K com o aumento da sucção aparece para os estágios com pressurização de ar, sendo mais acentuada do que o decréscimo verificado para os pontos obtidos com base na lei de Darcy.

Verifica-se também, como para os resultados dos ensaios em centrífuga, a tendência do modelo de Mualem-van Genuchten a subestimar a magnitude da condutividade hidráulica.

Ressalta-se que, em função do intervalo de medição do manômetro disponível durante ensaio com o solo arenoso, foram executados apenas três estágios de pressão para este solo, e, portanto, foram obtidos poucos pontos experimentais da Função-K.

A Tabela 4.8 e a Tabela 4.9 indicam os valores de condutividade hidráulica não saturada obtidos para o solo siltoso 1 através da lei de Darcy e equação de Richards, respectivamente. A Figura 4.34 apresenta os dados experimentais e as curvas dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner para este solo.

TABELA 4.8 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ENSAIO EM PERMEÂMETRO PARA SILTE 1 (AMOSTRAS 1 E 3) COM ANÁLISE ATRAVÉS DA LEI DE DARCY.

Amostra	Pressão aplicada (kPa)	Sucção média no centro (kPa)	Condutividade hidráulica (m/s) - Lei de Darcy				
			K_{D1}	K_{D2}	K_{D3}	K_{D4}	K_{D5}
1	0	2,58	$1,12 \times 10^{-6}$	$1,12 \times 10^{-6}$	$1,12 \times 10^{-6}$	$1,12 \times 10^{-6}$	$1,12 \times 10^{-6}$
1	39,24	24,22	$6,93 \times 10^{-7}$	$7,03 \times 10^{-7}$	$6,93 \times 10^{-7}$	$7,11 \times 10^{-7}$	$6,93 \times 10^{-7}$
3	0	2,35	$5,78 \times 10^{-7}$	$5,79 \times 10^{-7}$	$5,78 \times 10^{-7}$	$5,79 \times 10^{-7}$	$5,78 \times 10^{-7}$
3	29,43	17,53	$8,90 \times 10^{-7}$	$8,99 \times 10^{-7}$	$8,90 \times 10^{-7}$	$9,07 \times 10^{-7}$	$8,90 \times 10^{-7}$
3	39,24	37,87	$3,52 \times 10^{-8}$	$3,60 \times 10^{-8}$	$3,52 \times 10^{-8}$	$3,61 \times 10^{-8}$	$3,52 \times 10^{-8}$
3	49,05	47,84	$1,02 \times 10^{-8}$	$1,05 \times 10^{-8}$	$1,02 \times 10^{-8}$	$1,05 \times 10^{-8}$	$1,02 \times 10^{-8}$
3	58,86	58,64	$1,88 \times 10^{-8}$	$1,95 \times 10^{-8}$	$1,89 \times 10^{-8}$	$1,96 \times 10^{-8}$	$1,88 \times 10^{-8}$

TABELA 4.9 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ENSAIO EM PERMEÂMETRO PARA SILTE 1 (AMOSTRA 3) COM ANÁLISE ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE RICHARDS.

Pressão de ar (kPa)	z (cm)	Sucção média (kPa)	Condutividade hidráulica (m/s) Equação de Richards	
			K_{R1}	K_{R2}
0	2,5	2,05	$-2,26 \times 10^{-9}$	$-2,24 \times 10^{-9}$
	7,5	2,28	$-3,58 \times 10^{-9}$	$-3,58 \times 10^{-9}$
	12,5	2,31	$-7,92 \times 10^{-10}$	$-7,92 \times 10^{-10}$
	17,5	1,83	0	0
29,43	2,5	32,02	$6,77 \times 10^{-8}$	$5,89 \times 10^{-8}$
	7,5	32,73	$1,76 \times 10^{-7}$	$1,76 \times 10^{-7}$
	12,5	32,39	$1,04 \times 10^{-7}$	$1,04 \times 10^{-7}$
	17,5	32,09	$1,04 \times 10^{-7}$	$1,04 \times 10^{-7}$
39,24	2,5	42,27	$1,54 \times 10^{-8}$	$1,28 \times 10^{-8}$
	7,5	43,02	$1,76 \times 10^{-8}$	$1,76 \times 10^{-8}$
	12,5	42,54	$2,06 \times 10^{-8}$	$2,06 \times 10^{-8}$
	17,5	42,30	$3,49 \times 10^{-8}$	$3,49 \times 10^{-8}$
49,05	2,5	52,25	$1,65 \times 10^{-8}$	$1,30 \times 10^{-8}$
	7,5	52,98	$2,77 \times 10^{-8}$	$2,77 \times 10^{-8}$
	12,5	52,51	$5,32 \times 10^{-8}$	$5,33 \times 10^{-8}$
	17,5	52,39	$7,91 \times 10^{-8}$	$7,91 \times 10^{-8}$
58,86	2,5	62,89	$3,78 \times 10^{-8}$	$2,81 \times 10^{-8}$
	7,5	64,19	$6,85 \times 10^{-8}$	$6,83 \times 10^{-8}$
	12,5	63,96	$6,73 \times 10^{-8}$	$6,73 \times 10^{-8}$
	17,5	64,14	$6,81 \times 10^{-8}$	$6,81 \times 10^{-8}$

Para ensaio sem pressão com o solo siltoso 1 (amostra 3), a análise através da equação de Richards retornou valores negativos e nulos de condutividade hidráulica (Tabela 4.9). Esta ocorrência tem relação direta com a variação da umidade volumétrica ao longo do tempo durante este estágio. Conforme Figura 4.22(b), a umidade aumentou com o tempo durante a drenagem sem pressão da coluna de solo. Para a profundidade de 17,5 cm a umidade permaneceu constante, resultando no valor nulo da condutividade hidráulica nesta profundidade. Portanto, as magnitudes de condutividade calculadas pela equação de Richards para o estágio sem pressão não foram consideradas nos resultados finais (gráfico da Figura 4.34).

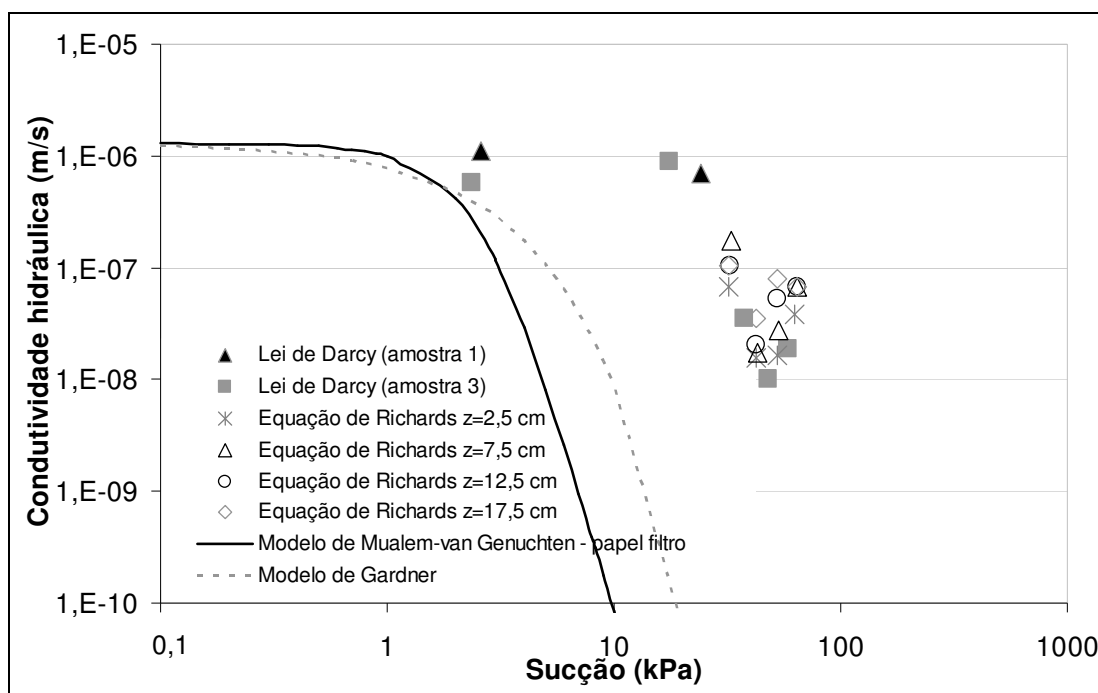


FIGURA 4.34 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE ENSAIOS EM PERMEÂMETRO COM PRESSURIZAÇÃO DE AR E CURVAS DOS MODELOS DE MUALEM-VAN GENUCHTEN E DE GARDNER PARA SOLO SILTOSO 1.

Os pontos experimentais obtidos para o solo siltoso 1 pela lei de Darcy e equação de Richards ficaram mais próximos entre si, quando comparados aos resultados obtidos para o solo arenoso.

Os pares experimentais de $K \times \psi$ para ambas as amostras (1 e 3) indicaram boa concordância, apresentando valores de K na mesma ordem de grandeza. No entanto, é importante destacar que, para a amostra 1, foram obtidos apenas dois pontos experimentais em virtude da execução de apenas dois estágios de pressão, de forma que a comparação entre diferentes ensaios com o mesmo solo deve ser realizada com mais amostras e em intervalos maiores de sucção para análise mais consistente da repetibilidade do método.

A tendência de decréscimo de K com aumento da sucção mostra-se bem acentuada, com comportamento análogo ao apresentado pela curva ajustada através do modelo de Mualem-van Genuchten apesar do distanciamento entre a curva e os dados experimentais. Este distanciamento ocorre no sentido, já reportado por outros autores e neste estudo para o ensaio em centrífuga, de o modelo subestimar a magnitude da condutividade hidráulica não saturada para dada sucção. Verifica-se, no entanto, que a

diferença entre a estimativa do modelo e a experimental ficou muito maior do que a reportada por Dell'Avanzi (2006), McCartney e Zornberg (2010) e Reis *et al.* (2011). Para uma magnitude de sucção de 60 kPa, a estimativa da condutividade não saturada obtida experimentalmente através de ensaio em permeâmetro com aplicação de pressão de ar é da ordem de 10^{-8} , considerando o modelo de Mualem-van Genuchten, para a mesma sucção, a ordem de grandeza de K decresce para 10^{-16} , e considerando o modelo de Gardner, para 10^{-19} .

A Tabela 4.10 e a Tabela 4.11 indicam os valores de condutividade hidráulica não saturada obtidos para o solo siltoso 2 através da equação de Richards e lei de Darcy, respectivamente. A Figura 4.35 apresenta os dados experimentais bem como as curvas dos modelos de Mualem-van Genuchten e de Gardner.

TABELA 4.10 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ENSAIO EM PERMEÂMETRO PARA SILTE 2 COM ANÁLISE ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE RICHARDS.

Pressão de ar (kPa)	z (cm)	Sucção média (kPa)	Condutividade hidráulica (m/s) Equação de Richards	
			K_{R1}	K_{R2}
0	2,5	185,25	0	0
	7,5	236,58	$2,39 \times 10^{-9}$	$2,14 \times 10^{-9}$
	12,5	179,85	$1,84 \times 10^{-9}$	$2,06 \times 10^{-9}$
	17,5	218,37	0	0
98,10	2,5	290,10	$-3,60 \times 10^{-10}$	$6,72 \times 10^{-11}$
	7,5	326,96	$-1,49 \times 10^{-10}$	$-1,38 \times 10^{-10}$
	12,5	281,46	$3,67 \times 10^{-10}$	$4,00 \times 10^{-10}$
	17,5	318,18	$7,44 \times 10^{-10}$	$6,87 \times 10^{-10}$
196,20	2,5	393,43	$-1,65 \times 10^{-10}$	$9,97 \times 10^{-11}$
	7,5	448,79	$3,75 \times 10^{-9}$	$3,33 \times 10^{-9}$
	12,5	419,03	$4,20 \times 10^{-9}$	$4,46 \times 10^{-9}$
	17,5	450,91	$2,89 \times 10^{-9}$	$2,70 \times 10^{-9}$
245,25	2,5	451,47	$-2,84 \times 10^{-9}$	$2,39 \times 10^{-9}$
	7,5	568,26	$1,03 \times 10^{-8}$	$7,86 \times 10^{-9}$
	12,5	537,10	$6,16 \times 10^{-9}$	$6,55 \times 10^{-9}$
	17,5	525,19	$1,47 \times 10^{-9}$	$1,51 \times 10^{-9}$
294,30	2,5	593,00	$-3,97 \times 10^{-9}$	$5,63 \times 10^{-9}$
	7,5	735,90	$1,61 \times 10^{-8}$	$1,14 \times 10^{-8}$
	12,5	672,00	$1,10 \times 10^{-8}$	$1,25 \times 10^{-8}$
	17,5	603,94	$6,49 \times 10^{-9}$	$7,39 \times 10^{-9}$

TABELA 4.11 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO ENSAIO EM PERMEÂMETRO PARA SILTE 2 COM ANÁLISE ATRAVÉS DA LEI DE DARCY.

Pressão aplicada (kPa)	Sucção média no centro (kPa)	Condutividade hidráulica (m/s) - Lei de Darcy				
		K_{D1}	K_{D2}	K_{D3}	K_{D4}	K_{D5}
0	209,60	6,85E-10	7,67E-10	6,85E-10	7,67E-10	6,70E-10
98,1	259,91	9,63E-10	1,12E-09	9,60E-10	1,16E-09	9,41E-10
196,2	385,02	5,20E-09	6,53E-09	5,21E-09	6,79E-09	5,01E-09
245,25	546,23	8,90E-09	1,22E-08	9,04E-09	1,24E-08	8,59E-09
294,3	667,09	1,68E-10	2,45E-10	1,65E-10	2,48E-10	1,62E-10

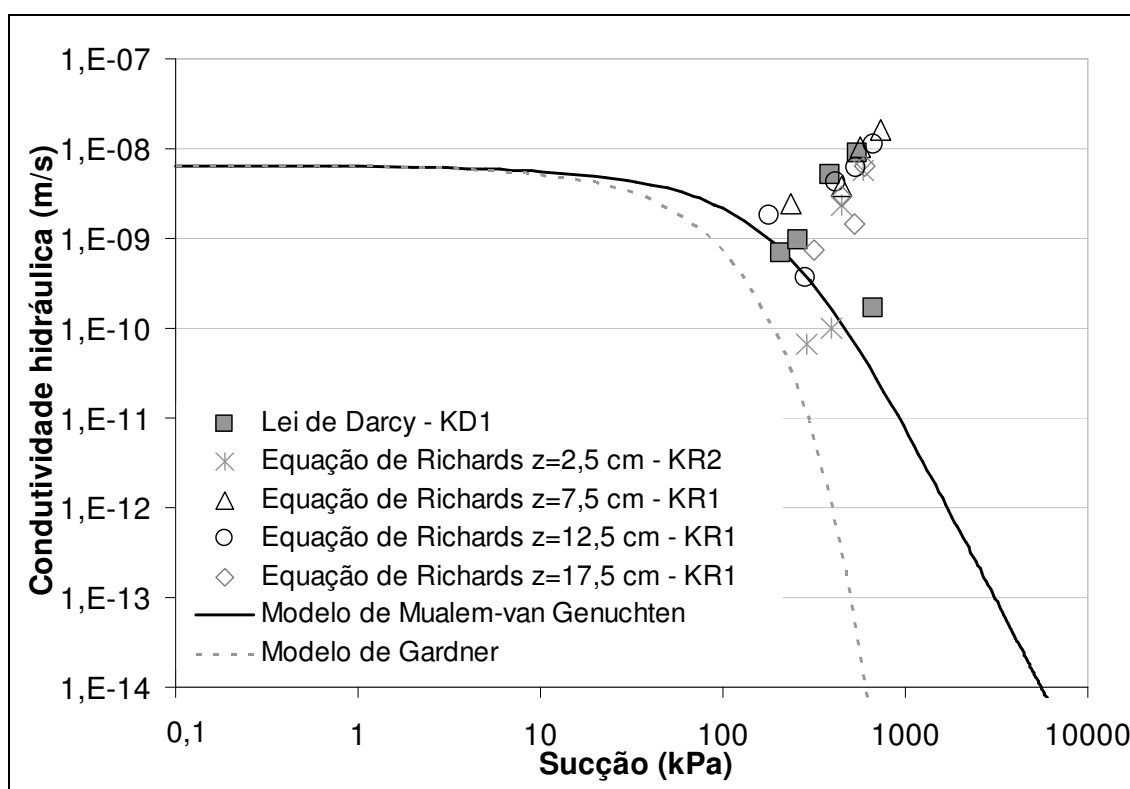


FIGURA 4.35 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE ENSAIOS EM PERMEÂMETRO COM PRESSURIZAÇÃO DE AR E CURVAS DOS MODELOS DE MUALEM-VAN GENUCHTEN E DE GARDNER PARA O SOLO SILTOSO 2.

A análise do solo siltoso 2 através da equação de Richards também retornou alguns valores nulos, em função de não haver variação da umidade volumétrica ao longo do tempo para alguns estágios de pressurização na profundidade considerada.

Os dados da Tabela 4.10 indicam também alguns valores negativos de K , os quais, ao contrário do ocorrido para o solo siltoso 1, não estão relacionados ao aumento da umidade volumétrica ao longo do tempo, mas sim

ao alto gradiente de sucção. Este fato pode ser claramente percebido quando se compara as magnitudes de K_{R1} e K_{R2} (o qual considera a simplificação de gradiente hidráulico unitário) em $z=2,5$ cm. Nesta profundidade, o gradiente de sucção se torna muito alto em virtude da proximidade com a zona saturada na qual $\psi=0$. A presença de um valor elevado negativo no denominador da equação de Richards faz com que o valor da condutividade hidráulica se torne negativo. Quando se analisa os dados com a consideração de que o gradiente de sucção é nulo (K_{R2}) os resultados experimentais ficam positivos. Em função destas situações, os valores negativos e nulos obtidos não foram apresentados como resultados finais no gráfico da Figura 4.35.

Os pontos experimentais obtidos para o solo siltoso 2, tanto através da análise pela lei de Darcy quanto pela equação de Richards, apresentaram grande dispersão. Para sucções de cerca de 380 a 450 kPa a magnitude da condutividade hidráulica aumentou com o aumento da sucção, apresentando, para esta faixa de sucção, comportamento oposto ao esperado. Para sucções menores e maiores a estas, os pontos experimentais ficaram mais próximos da curva ajustada através do modelo de Mualem-van Genuchten, não apresentando a mesma tendência identificada para o solo siltoso 1 do modelo subestimar K em várias ordens de grandeza.

Através da equação de Richards obtém-se um valor de condutividade hidráulica a cada profundidade e tempo em que as leituras das sondas de TDR foram coletadas. Dessa forma, é possível estimar o perfil de condutividade hidráulica não saturada ao longo da amostra de solo, apresentado na Figura 4.36.

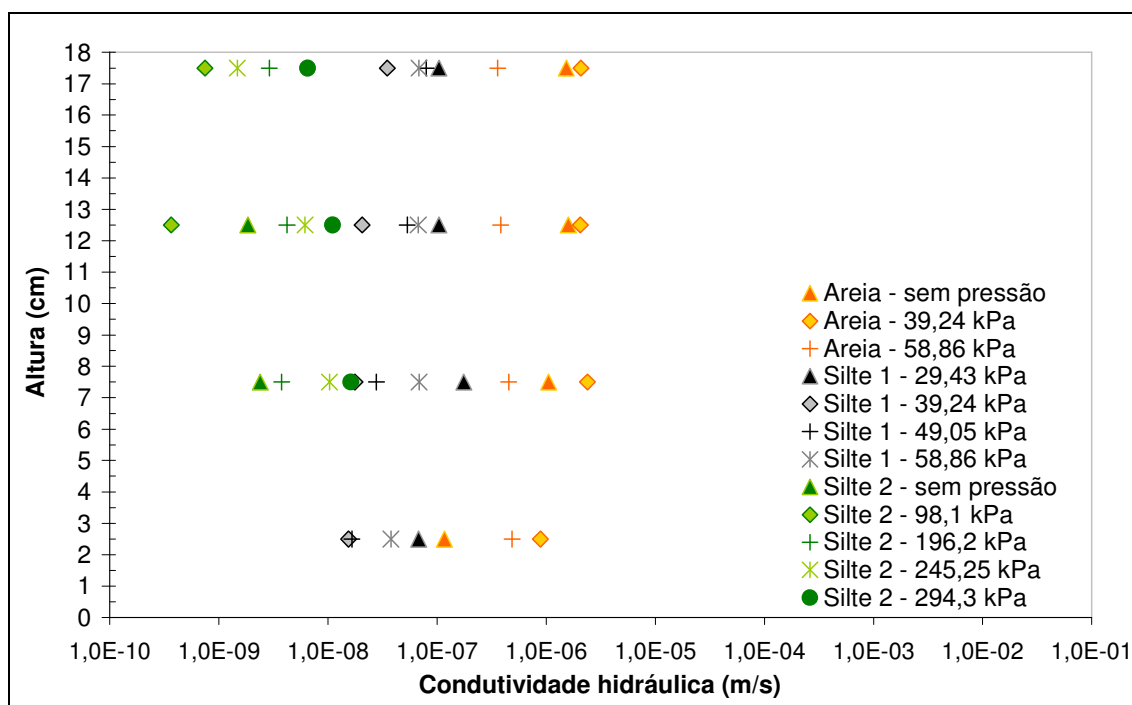


FIGURA 4.36 – PERFIL DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.

Para todos os solos, identifica-se através das tabelas apresentadas que não ocorre variação significativa da magnitude da condutividade hidráulica para as diferentes hipóteses de cálculo consideradas para o gradiente hidráulico. Dessa forma, verifica-se a validade da simplificação de gradiente hidráulico unitário, tanto na lei de Darcy, quanto na equação de Richards. Em virtude da similaridade dos resultados, os valores plotados se referem a K_{D1} e a K_{R1} , calculados conforme indicado nos Quadros 4.1 e 4.2.

A diferença nas magnitudes da condutividade hidráulica obtida através da análise pela lei de Darcy e da análise pela equação de Richards está relacionada principalmente ao fato de que a lei de Darcy utiliza diretamente os dados medidos de volume de fluxo de saída de água do solo para determinação da velocidade, enquanto que na equação de Richards o termo referente à velocidade de fluxo é determinado com base na variação temporal da umidade estimada pelas sondas de TDR. Dessa forma, a estimativa pela equação de Richards está sujeita aos erros inerentes à utilização da curva de calibração das sondas para definição da umidade volumétrica.

Além disso, a análise pela lei de Darcy utiliza dados médios obtidos entre diferentes estágios de pressurização, enquanto que para a equação de

Richards são utilizados valores a cada instante de tempo e a cada profundidade da coluna de solo.

Dessa forma, através da equação de Richards obtém-se maior número de pontos experimentais, entretanto, com maior dispersão nas magnitudes estimadas, análise mais trabalhosa dos dados experimentais e maior possibilidade de erros pela determinação indireta do volume de fluxo de saída através dos dados de umidade.

Para verificar possíveis alterações volumétricas nas amostras após o ensaio, a altura final da coluna de solo foi medida. A variação de altura máxima para o solo siltoso 1 foi de 1,2 cm (medida na amostra 3), o que representa uma deformação vertical de 4,5%. Para o solo siltoso 2 a variação de altura foi menor do que 0,5 mm, levando a deformações verticais de 1,8%. Para o solo grosso a variação foi de cerca de 1 cm, o que corresponde a pouco menos de 4% de deformação vertical. A Figura 4.37, a Figura 4.38 e a Figura 4.39 apresentam imagens dos solos arenoso, siltoso 1 e siltoso 2, respectivamente, ao final do ensaio em permeâmetro.



FIGURA 4.37 – SOLO ARENOSO AO FINAL DO ENSAIO EM PERMEÂMETRO.



FIGURA 4.38 – SOLO SILTOSO 1 AO FINAL DO ENSAIO EM PERMEÂMETRO: (a) AMOSTRA 1; (b) AMOSTRA 3.



FIGURA 4.39 – SOLO SILTOSO 2 AO FINAL DO ENSAIO EM PERMEÂMETRO.

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A Figura 4.40 e a Figura 4.41 apresentam os resultados para condutividade hidráulica não saturada dos solos siltosos 1 e 2, respectivamente, incluindo ensaios em centrífuga e permeâmetro e as curvas ajustadas pelo modelo de Mualem-van Genuchten.

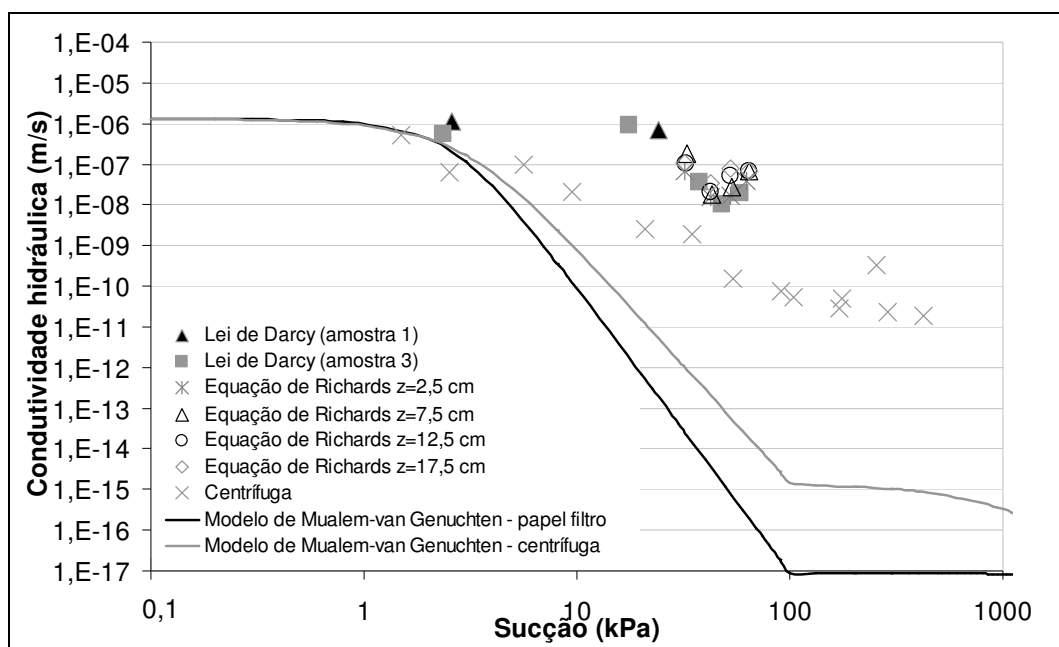


FIGURA 4.40 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E EM PERMEÂMETRO PARA O SOLO SILTOSO 1.

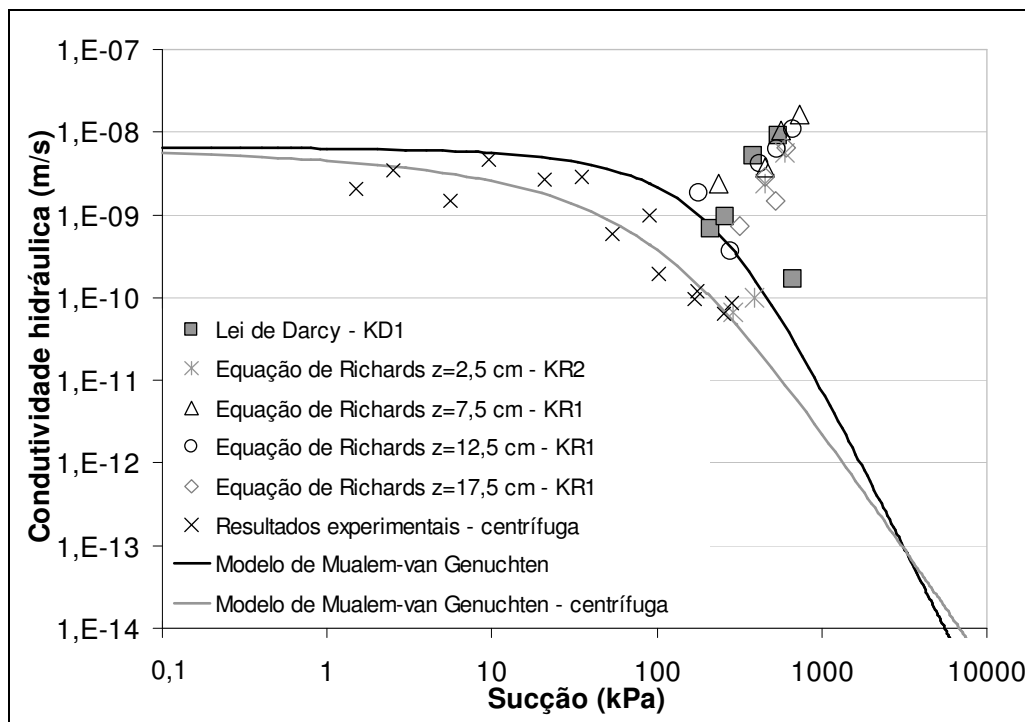


FIGURA 4.41 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS EM CENTRÍFUGA E EM PERMEÂMETRO PARA O SOLO SILTOSO 2.

Para o solo siltoso 1, verifica-se que a estimativa baseada nos ensaios em permeâmetro resultou em valores maiores de condutividade hidráulica quando comparados aos valores finais dos ensaios em centrífuga. A diferença de magnitude da condutividade hidráulica estimada através dos dois métodos é de cerca de duas ordens de grandeza, reduzindo com o aumento da sucção.

Para o solo siltoso 2, os valores de condutividade hidráulica obtidos através dos ensaios em permeâmetro também ficaram acima daqueles estimados por meio de ensaio em centrífuga. No entanto, os pontos experimentais em permeâmetro apresentaram grande dispersão em um pequeno intervalo de sucção. Para este solo, os resultados experimentais em centrífuga apresentaram comportamento mais próximo ao esperado e melhor ajuste aos modelos matemáticos analisados.

Verifica-se desta forma que a atuação de força centrípeta ou de pressão de ar para aceleração do fluxo induz comportamentos distintos no solo, levando a estimativas diferentes da condutividade hidráulica não saturada. A estimativa por meio de ensaio em centrífuga apresenta resultados mais próximos aos valores esperados, modelados pela curva de Mualem-van Genuchten.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foram executados ensaios de condutividade hidráulica em solos não saturados através de um método em centrífuga de pequena escala e de um método em permeâmetro com pressurização de ar no topo da amostra de solo para acelerar o fluxo de água. Diferentes formas de análise dos resultados advindos do ensaio em permeâmetro foram apresentadas e comparadas a fim de definir a melhor metodologia para análise deste tipo de ensaio com pressão de ar, incluindo a avaliação da influência do procedimento de análise dos dados experimentais no resultado final de condutividade hidráulica.

Os resultados experimentais foram ainda comparados a dois modelos matemáticos que descrevem a Função-K: modelo de Gardner e modelo de Mualem-van Genuchten.

Dentro do escopo dos ensaios de permeabilidade, a condutividade hidráulica saturada de solos finos foi avaliada por meio de ensaio de adensamento e ensaio de carga variável com acoplamento de bureta graduada à célula de adensamento. Os resultados obtidos pelos dois métodos foram comparados.

Ainda, para cumprir o objetivo da pesquisa foram utilizadas sondas de TDR para determinação do perfil de umidade da coluna de solo disposta no permeâmetro. Fato que permitiu a avaliação da utilização deste equipamento em laboratório.

Como etapa complementar, foi determinada também a CRUS dos solos finos em centrífuga.

Das atividades envolvidas na determinação da curva de retenção de umidade e da condutividade hidráulica não saturada de solos siltosos em centrífuga é possível concluir que:

- Os resultados para curva de retenção de umidade através de ensaio em centrífuga apresentam boa concordância com as curvas obtidas por meio do método do papel filtro e ajustes de van Genuchten e de Gardner (considerando parâmetro b ajustado).
- A dificuldade em definição do tempo médio de ensaio através dos gráficos de volume de água na amostra em função da raiz quadrada do tempo fez surgir a necessidade de utilização de gráficos do volume em

função do tempo apenas, pelos quais a tendência à assíntota horizontal da porção final da curva pode ser melhor visualizada. O uso de um ou de outro método gráfico não levou a variações significativas na magnitude final de condutividade hidráulica estimada.

- Apesar das dificuldades em determinação do tempo médio de ensaio para ensaio em centrífuga, os resultados experimentais de condutividade hidráulica obtidos por este método apresentaram-se coerentes aos indicados por Sterck (2011) no desenvolvimento da metodologia de ensaio em centrífuga.
- Para o solo siltoso 1 os resultados experimentais obtidos em centrífuga ficaram acima da curva do modelo de Mualem-van Genuchten e de Gardner para sucções acima de cerca de 10 kPa. Para os pontos experimentais abaixo deste valor as curvas tiveram melhor concordância. Isto indica que os modelos matemáticos tendem a subestimar a Função-K.
- Para o solo siltoso 2 a curva ajustada pelo modelo de Mualem-van Genuchten para CRUS obtida em centrífuga apresentou ótima concordância com os dados experimentais de centrífuga, mas apresentou magnitudes levemente menores do que a da CRUS obtida por meio de papel filtro.
- Os dois solos finos com comportamentos diferentes foram testados simultaneamente em centrífuga apresentando resultados satisfatórios para curva de retenção de umidade e função de condutividade hidráulica.
- Durante os ensaios com amostras centrifugadas não foram detectadas variação significativas de volume das amostras.

Com relação aos ensaios em permeâmetro com pressurização de ar chegou-se as seguintes conclusões:

- Para o solo arenoso e siltoso 1 a tendência do fluxo de saída foi de redução com o aumento da pressurização. Comportamento oposto foi apresentado pelo solo siltoso 2, fato relacionado às diferenças nas características de permeabilidade dos solos e nas condições iniciais de saturação das amostras.

- As sucções máximas atingidas no ensaio com pressurização de ar foram de aproximadamente 65 kPa, para o solo siltoso 1 e arenoso, e de 740 kPa, para o solo siltoso 2. A umidade volumétrica manteve-se alta (cerca de 30%) ao final do ensaio para ambos os solos finos.
- Os perfis de umidade volumétrica e sucção ao longo do tempo indicam que é válida a simplificação de gradiente hidráulico unitário na porção superior da amostra.
- A magnitude da condutividade hidráulica não varia significativamente com as diferentes formas de contabilização do gradiente de sucção (média entre início e final de cada estágio, média para todos os valores de sucção ao longo do ensaio ou gradiente nulo).
- Os valores de condutividade hidráulica determinados por meio da lei de Darcy e da equação de Richards diferiram em cerca de 2 ordens de magnitude para o solo arenoso, sendo que os últimos apresentaram maior concordância com as curvas ajustadas aos modelos matemáticos, principalmente ao de Gardner.
- Os pontos experimentais obtidos para os solos finos pela lei de Darcy e equação de Richards ficaram mais próximos entre si, quando comparados aos resultados obtidos para o solo arenoso.
- Os pontos experimentais obtidos para o solo menos permeável, silte 2, tanto através da análise pela lei de Darcy quanto pela equação de Richards, apresentaram grande dispersão e comportamento oposto ao esperado, de aumento da condutividade hidráulica com aumento da sucção para certo intervalo de sucção.
- Através da equação de Richards obtém-se maior número de pontos experimentais, entretanto, com maior dispersão nas magnitudes estimadas, análise mais trabalhosa dos dados experimentais e maior possibilidade de erros pela determinação indireta do volume de fluxo de saída através dos dados de umidade estimados com base na leitura das sondas de TDR.
- Os pontos experimentais em permeâmetro se restringiram a um pequeno intervalo de valores de sucção (entre 2 e 65 kPa, para os solos arenoso e siltoso 1, e entre 180 e 740 kPa, para o solo siltoso 2), devido

às pressões de ar aplicadas e ao intervalo de medição dos manômetros utilizados.

- O modelo de Mualem-van Genuchten tende a subestimar a magnitude da condutividade hidráulica não saturada para dada sucção. Para os solos arenoso e siltoso 1 a diferença entre a estimativa do modelo e a experimental ficou muito maior do que a reportada na literatura (Dell'Avanzi, 2006; McCartney e Zornberg, 2010; Reis *et al.*, 2011).
- Para o solo siltoso 2 não foi identificada a tendência do modelo do modelo de Mualem-van Genuchten de subestimar K em várias ordens de grandeza.
- Durante os ensaios com amostras pressurizadas não foram detectadas variação significativas de volume das amostras. As deformações verticais foram de menos de 4% para o solo grosso, 4,5%, para o solo siltoso 1, e menos de 1,8% para o solo siltoso 2.

Considerando a comparação entre os resultados experimentais de centrífuga e permeâmetro verificou-se que:

- O comportamento do solo é distinto quanto submetido a atuação de força centrípeta ou de pressão de ar para aceleração do fluxo, levando a estimativas diferentes da condutividade hidráulica não saturada.
- A estimativa de condutividade hidráulica não saturada baseada nos ensaios em permeâmetro resultou em valores maiores de condutividade hidráulica quando comparados aos valores finais dos ensaios em centrífuga.
- Os resultados experimentais obtidos através de ensaio em centrífuga apresentaram comportamento mais próximo ao esperado e melhor ajuste aos modelos matemáticos analisados.
- Através de ensaio em centrífuga é possível obter simultaneamente a CRUS e a Função-K de dois solos finos em aproximadamente 18 horas. Enquanto que, em ensaio com aplicação de pressão de ar, é necessário conhecer previamente a CRUS e a Função-K é obtida em intervalo de tempo muito maior de aproximadamente 115 horas a 400 horas (aproximadamente 17 dias) podendo ser ainda mais alto, dependendo

das características do solo fino e do número de estágios de pressão considerados.

Das demais etapas executadas neste estudo, conclui-se que:

- A determinação da condutividade hidráulica saturada por meio dos parâmetros do ensaio de adensamento tende a superestimar as magnitudes de K , quando comparados a ensaios de carga variável.
- As sondas de TDR dispostas em quatro alturas diferentes ao longo da amostra de solo na coluna do permeâmetro indicaram magnitudes coerentes de umidade volumétrica na maioria dos casos. Para os solos finos a sonda localizada na altura 7,5 cm subestimou os valores de umidade volumétrica. Para o solo grosso este comportamento não foi identificado.

Considerando as conclusões obtidas a partir deste estudo é possível elencar algumas sugestões para continuidade da avaliação da determinação da condutividade hidráulica através de ensaio com aplicação de pressão de ar:

- Análise da repetibilidade do método executando maior número de ensaios com o mesmo solo moldado nas mesmas condições.
- Executar ensaios com maior número de valores de pressão aplicada e menor intervalo entre estes valores a fim de obter mais pontos experimentais de Função- K , para isto é necessário a utilização de manômetros com menor intervalo de medição do que os utilizados no presente estudo. Pode se considerar, neste cenário, a substituição dos manômetros por transdutores, os quais permitem medidas mais precisas da pressão de ar aplicada.
- Monitorar o fluxo de saída utilizando transdutor de pressão, ao invés de balança, a fim de obter maior precisão na determinação do volume de água, variável essencial na estimativa de K , principalmente quando se considera válida, como demonstrado pelos resultados apresentados neste estudo, a simplificação de gradiente hidráulico unitário.

Com relação ao ensaio de condutividade hidráulica não saturada em centrífuga de pequena escala propõe-se para futuras pesquisas:

- Realização de ensaios utilizando outros tipos de solos com comportamentos distintos simultaneamente para verificação da aplicabilidade do método.
- Avaliar se há influência das paradas contínuas, para monitoramento da massa da amostra, nos valores de condutividade hidráulica não saturada obtidos por este método.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12004**: Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos - Método de ensaio. ABNT, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**: Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional – Método de ensaio. ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12051**: Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos - Método de ensaio. ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Ensaio de permeabilidade a carga constante. ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solos. ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Dezembro, 1984.

ASTM D 5298/94 – Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. **American Society for Testing and Materials**. USA. 1994.

ASTM D 54253/93 – Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table **American Society for Testing and Materials**. USA. 1993.

ASTM D 6527. Standard test method for determining unsaturated and saturated hydraulic conductivity in porous media by steady-state centrifugation. **American Society for Testing and Materials**. West Conshohoken, PA, 2000.

ASTM D 6527/08 – Standard Test Method for Determining Unsaturated and Saturated Hydraulic Conductivity in Porous Media by Steady-State Centrifugation. **American Society for Testing and Materials**. USA. 2008.

ASTM D 6836. Standard test methods for determination of the soil water characteristic curve for desorption using a hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, and/or centrifuge. **American Society for Testing and Materials**. West Conshohocken, PA, 2002.

BENSON, C. H., GRIBB, M. M. Measuring Unsaturated Hydraulic Conductivity in the Laboratory and Field. In: **Geotech.Special Publication** no.68, ASCE, Geolnstitute, 1997, p. 113-168.

BROOKS, R.H., COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. Colorado State Univ., **Hydrology Paper**, No. 3, p.27. 1964.

CAMILOTTI, G.; KROETZ, M., e DELL'AVANZI, E. Influência de um agente químico nas características de compactidade e resistência de uma areia. *Geojuvem* 2006, ABMS, pp. 5-10, Nova Friburgo.

CAMPBELL, G.S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science**, vol. 117, no6, pp. 311 – 314. Junho, 1974.

CHILDS, E. C. & COLLINS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. **Roy. Soc. Proc.**, London, 201, pp.392-405. 1950.

CHOO, P.L.; YANFUL E.K. Water flow through cover soils using modeling and experimental methods. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol. 126, no.4, paper No.12701. 2000.

CONCA, J. L.; WRIGHT, J. V. The UFA method for rapid, direct measurements of unsaturated transport properties in soil, sediment and rock. **Aus J Soil Res**, 1992, 36, p 291-315.

COREY, A. T. Mechanics of heterogeneous fluids in porous media. **Water Resources Publication**, Littleton, Colo, 1977.

DARCY, H. Determination of the laws of water flow through sand. In: **The Public Fountains of The City of Dijon**. Victor Dalmont, Paris, 1856. Disponível em: <<http://biosystems.okstate.edu/darcy/index.htm>>. Acesso em: abr. 2010.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DELL'AVANZI, E., ZORNBERG, J. G., e CABRAL, A. Suction profiles and scale factors for unsaturated flow under increased gravitational field. *Soils and Foundations*. 2004. 44(3), 1-11.

DELL'AVANZI, E. **Unsaturated flow under increased gravitational field**. Tese (doutorado) - University of Colorado, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering. Boulder, CU, Estados Unidos, 2004.

DELL'AVANZI, E. Comparison Between Predicted and Measured Hydraulic Conductivity of an Unsaturated Soil. In: **Fourth International Conference on Unsaturated Soils UNSAT 2006**, 2006, Arizona. UNSAT 2006. Arizona : ASCE, 2006. v. 2. p. 1513-1519.

FREDLUND, D. G. & XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 31, nº 3, pp. 521-532. 1994.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley and Sons, INC., 1993.

FURLAN, G. C. **Avaliação da influência de um agente repelente sobre as propriedades mecânicas e hidráulicas de um solo arenoso**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Curitiba, 2008.

FURLAN, G.C. e DELL'AVANZI, E. **Avaliação na Influência de um Agente Contaminante Hidrofóbico nas Características de Retenção de Umidade de um Solo Arenoso**, VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO. Recife, PE pp18-1. 2007.

GARDNER, R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. **Soil Science**, Baltimore, 43, pp. 277-283. 1937.

GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **U. S. Department of Agriculture**. 1958.

GUIZELINI, A. P. **Estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros sanitários**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998.

KLUTE A., DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: Klute, A. (ed) *Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods*, Madison: **American Society of Agronomy; Soil Science Society of America**, 1982. 2nd ed., p 687-734.

LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. Massachusetts Institute of Technology, New York: 1969.

LANGE, L. C. et al. Estudo do transporte de contaminantes em meios porosos aplicado a aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. et al. (Org.). **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades**. Rio de Janeiro: RiMa/ABES, 2002.

LEONG E.C., RAHARDJO H. Permeability functions for unsaturated soils. **J Geotech Geoenviron Eng** 123: 1118–1126, 1997.

LEONG, E. C., RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 25, no3, pp. 1 – 12. 2002.

Lo PRESTI, D.C.F., PEDRONI, S., CRIPPA, V. Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study. **Geotechnical Testing Journal**. Vol. 15, no 2, pp. 180-189. 1992.

LOPES, M.B.L. **Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2006.

MARINHO, F.A.M, **Medição de sucção em solos**. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados - Solos não saturados, vol. 2, pp.373 – 397. Rio de Janeiro. 1997.

MASROURI, F.; BICALHO, K. V.; KATSUYUKI, K. Laboratory hydraulic testing in unsaturated soils. **Geotech Geol Eng**, 2008, 26, p 691-704.

MCCARTNEY, J.S. e PARKS, J. Uncertainty in predicted hydraulic conductivity functions of unsaturated soils. **17th ICSMGE Conference**, 2009. Alexandria, Egypt.

McCARTNEY, J.S.; ZORNBERG, J.G.; VILAR, O. M. Estimation of the Hydraulic Conductivity Function of Unsaturated Clays using an Infiltration Column Test. 4th **Brazilian Conference on Unsaturated Soils (NSAT)**. 2007. Salvador, Brazil. 10 pp

MUALEM, Y. Hysteretical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, **Water Resources Research**, vol.12, no.6, pp.1248-1254. 1976.

NARASIMHAN, T. N. Central Ideas of Buckingham (1907): A Century Later. **Vadose Zone Journal**. 2007, vol. 6, n. 4.

NIMMO, J. R. e LANDA, E. R. The Soil Physics Contributions of Edgar Buckingham. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 2005, 69:328–342.

NIMMO, J. R. e MELLO, K. A. Centrifugal Techniques for Measuring Saturated Hydraulic Conductivity. **Water Resour. Res.** 1991, 27(6), 1263–1269.

NIMMO, J. R.; PERKINS, K. S. e LEWIS, A. M. Steady-state centrifuge. In: **Methods of Soil Analysis**, Part 1, Physical Methods, 3rd ed., edited by J. H. Dane and G. C. Topp, pp. 903–916, Soil Sci. Soc. of Am., Madison, Wis, 2002.

NIMMO, J. R.; RUBIN, J. e HAMMERMEISTER, D. P. Unsaturated flow in a centrifugal field: measurement of hydraulic conductivity and testing of Darcy's law. **Water Resources Research**. 1987, 23, 124-134.

NIMMO, J.R.; STONESTROM, D. A. e AKSTIN, K. C. The feasibility of recharge rate determinations using the steady-state centrifuge method. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 1994, 58:49–56.

OLIVEIRA, O. M., MARINHO, F. A. M. **Evaluation of filter paper calibration**. In: Proceedings of the fourth international conference on unsaturated soils, 2006, Carefree - Arizona. Unsaturated Soils. American Society of Civil Engineers, vol. 2. pp. 1845-1851. 2006.

PHENE, C. T. et al. **Measuring Soil Matric Potencial in Situ by Sensing Heat Dissipation within a Porous Body: I Theory and Sensor Construction**. In: Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1971b, 35 (1), p. 27-33.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Salesward-Discovery, 1996.

REIS, R. M.; STERCK, W. N.; RIBEIRO, A. B.; DELL'AVANZI,, E.; SABOYA, F.; TIBANA, S.; MARCIANO, C. R.; SOBRINHO, R. R. Determination of the Soil-Water Retention Curve and the Hydraulic Conductivity Function Using a Small Centrifuge. **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 34, No. 5, 2011.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous media, **Physics**, vol. 1, pp. 318-333. 1931.

SERRANO, S. E. **Hydrology for Engineers, Geologists, and Environmental Professionals: An Integrated Treatment of Surface, Subsurface, and Contaminant Hydrology**. HydroScience, 2007.

SIDDIQUI, S.I., DRNEVICH, V.P., DESCHAMPS, R.J. Time domain reflectometry development for use in geotechnical engineering. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 23, no 1, pp. 9 – 20. 2000.

SINGH, D. N.; KURIYAN, S. J. Estimation of hydraulic conductivity of unsaturated soil s using a geotechnical centrifuge. **Canadian Geotechnical Journal**, 39(3), pp. 684-694. 2002.

SINGH, D. N.; KURIYAN, S. J.; MADHURI, V. Application of a geotechnical centrifuge for estimation of unsaturated soil hydraulic conductivity. **Journal of Testing and Evaluation**, ASTM. 29 (6), (2001), 556-562.

SOARES, A. M. **Fluxo de gases e avaliação dos parâmetros geotécnicos do solo usado como camada de cobertura do aterro de resíduos sólidos urbanos da CODIN em Campos dos Goytacazes/RJ**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2008.

SRIVASTAVA, R.; YEH, J. T. C. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils. **Water Resources Research**, vol 27, pp. 753-762. 1991.

STERCK, W. N. **Estudo da função de condutividade hidráulica de solo não saturados através de amostras centrifugadas**. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2011.

SUWANSAWAT, S., BENSON, C. H. Cell size for water content-dielectric constant calibration for time domain reflectometry. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 22, pp. 3 - 12. 1999.

TOPP, G.C., ZEGELIN, S., WHITE, I. Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils. **Soil Science Society of America Journal**. Vol. 64, pp. 1244 – 1252. 2000.

TOPP, G.C., ZEGELIN, S., WHITE, I. Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils. **Soil Science Society of America Journal**. Vol. 64, pp. 1244 – 1252. 2000.

VAN DEN BERG, H.; PERFECT, E.; TU, C.; KNAPPETT, P.S.K.; LEAO, T.P. e DONAT, R.W. Unsaturated Hydraulic Conductivity Measurements with Centrifuges: A Review. **Vadose Zone Journal**. 2009; 8: 531-547.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soils Sci. Am. J.** 1980, 44: 892-898.

WRIGHT, W. C., YODER, R. E., RAINWATER, N. R., DRUMM, E. C. Calibration of five-segment time domain reflectometry probes for water content measurement in high density materials. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 24, no 2, pp. 172 – 184. 2001.

ZAZUETA, F. S., XIN J. **Soil moisture sensors**. Bulletin 292, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. 1994. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/EH226>> Acesso em: mar. 2010.

ZORNBERG, J. G.; McCARTNEY, J. S. Centrifuge permeameter for unsaturated soils I: theoretical basis and experimental developments. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Posted ahead of print, january 8, 2010.

ZORNBERG, J.G.; McCARTNEY, J.S. Centrifuge permeameter for usaturated soil II: Measurement of the Hydraulic Characteristics of an Unsaturated Clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Posted ahead of print, january 8, 2010.

APÊNDICE A

DADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA EM PERMEÂMETRO COM APLICAÇÃO DE PRESSÃO DE AR

1. SOLO ARENOSO:

Valores de leitura do TDR, umidade gravimétrica, umidade volumétrica e sucção em função do tempo

Pressão de ar (kPa)	Tempo (min)	Leitura TDR				Umidade gravimétrica				Umidade volumétrica				Sucção (kPa)			
		z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm
0	0	20,8	21,1	18,7	15,6	24,81%	25,10%	22,75%	19,48%	36,35%	36,77%	33,33%	28,54%	2,45	2,41	2,67	2,96
	3	20,9	21,4	20,7	18,6	24,91%	25,38%	24,72%	22,65%	36,49%	37,19%	36,21%	33,18%	2,43	2,37	2,46	2,68
	8	20,8	18,8	15,4	12,7	24,81%	22,85%	19,26%	16,11%	36,35%	33,48%	28,21%	23,60%	2,45	2,66	2,98	3,23
	10	20,8	18,9	15,4	12,8	24,81%	22,95%	19,26%	16,23%	36,35%	33,63%	28,21%	23,78%	2,45	2,65	2,98	3,22
	15	20,9	18,9	15,5	12,9	24,91%	22,95%	19,37%	16,35%	36,49%	33,63%	28,38%	23,96%	2,43	2,65	2,97	3,21
	20	20,8	18,9	15,5	12,9	24,81%	22,95%	19,37%	16,35%	36,35%	33,63%	28,38%	23,96%	2,45	2,65	2,97	3,21
	25	20,9	18,9	15,6	12,9	24,91%	22,95%	19,48%	16,35%	36,49%	33,63%	28,54%	23,96%	2,43	2,65	2,96	3,21
39,24	0	19,4	15	12,7	12,5	23,45%	18,81%	16,11%	15,86%	34,36%	27,56%	23,60%	23,24%	41,84	42,25	42,47	42,49
	1	12	10,3	8,9	9,7	15,24%	13,02%	11,04%	12,19%	22,33%	19,07%	16,18%	17,86%	42,54	42,73	42,91	42,80
	3,5	11,4	9,4	8,2	8,5	14,47%	11,76%	10,00%	10,45%	21,21%	17,24%	14,65%	15,31%	42,60	42,84	43,02	42,97
	8	11,1	8,3	7,5	7,4	14,08%	10,15%	8,91%	8,75%	20,64%	14,87%	13,05%	12,82%	42,64	43,00	43,14	43,16
	15	11,6	7,5	7	6,7	14,73%	8,91%	8,10%	7,60%	21,58%	13,05%	11,86%	11,13%	42,58	43,14	43,24	43,31
	20	11,6	7,6	6,7	6,4	14,73%	9,07%	7,60%	7,08%	21,58%	13,28%	11,13%	10,38%	42,58	43,12	43,31	43,38
	25	11,7	7,4	6,5	6,2	14,86%	8,75%	7,26%	6,74%	21,77%	12,82%	10,63%	9,87%	42,57	43,16	43,35	43,43
	30	11,6	7	6,3	6	14,73%	8,10%	6,91%	6,38%	21,58%	11,86%	10,13%	9,35%	42,58	43,24	43,40	43,49
	38	11,4	6,8	6,1	5,9	14,47%	7,76%	6,56%	6,20%	21,21%	11,38%	9,61%	9,09%	42,60	43,28	43,46	43,51
	45	11,4	6,5	6	5,8	14,47%	7,26%	6,38%	6,02%	21,21%	10,63%	9,35%	8,83%	42,60	43,35	43,49	43,55
	51	11,5	6,5	5,9	5,7	14,60%	7,26%	6,20%	5,84%	21,40%	10,63%	9,09%	8,56%	42,59	43,35	43,51	43,58
	60	11,6	6,4	5,8	5,6	14,73%	7,08%	6,02%	5,66%	21,58%	10,38%	8,83%	8,29%	42,58	43,38	43,55	43,61

Pressão de ar (kPa)	Tempo (min)	Leitura TDR				Umidade gravimétrica				Umidade volumétrica				Sucção (kPa)			
		z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm
58,86	0	12	6,8	5,7	5,2	15,24%	7,76%	5,84%	4,91%	25,42%	13,52%	10,46%	8,97%	42,37	43,10	43,37	43,53
	1	7	6,4	5,6	5,1	8,10%	7,08%	5,66%	4,71%	11,86%	10,38%	8,29%	6,91%	62,86	63,00	63,23	63,42
	3	6,5	6,1	5,1	5,1	7,26%	6,56%	4,71%	4,71%	10,63%	9,61%	6,91%	6,91%	62,97	63,08	63,42	63,42
	7	6,2	5,8	5	4,9	6,74%	6,02%	4,52%	4,32%	9,87%	8,83%	6,62%	6,33%	63,05	63,17	63,47	63,51
	10	6,1	5,6	4,9	4,9	6,56%	5,66%	4,32%	4,32%	9,61%	8,29%	6,33%	6,33%	63,08	63,23	63,51	63,51
	15	5,8	5,4	4,8	4,7	6,02%	5,29%	4,13%	3,93%	8,83%	7,74%	6,04%	5,75%	63,17	63,30	63,56	63,62
	24	5,6	5,1	4,7	4,6	5,66%	4,71%	3,93%	3,72%	8,29%	6,91%	5,75%	5,45%	63,23	63,42	63,62	63,68
	30	5,3	5	4,6	4,5	5,10%	4,52%	3,72%	3,52%	7,47%	6,62%	5,45%	5,15%	63,34	63,47	63,68	63,74
	35	5,3	4,9	4,5	4,5	5,10%	4,32%	3,52%	3,52%	7,47%	6,33%	5,15%	5,15%	63,34	63,51	63,74	63,74
	40	5,2	4,9	4,5	4,4	4,91%	4,32%	3,52%	3,31%	7,19%	6,33%	5,15%	4,85%	63,38	63,51	63,74	63,80
	45	5,2	4,8	4,4	4,4	4,91%	4,13%	3,31%	3,31%	7,19%	6,04%	4,85%	4,85%	63,38	63,56	63,80	63,80
	50	5	4,8	4,4	4,3	4,52%	4,13%	3,31%	3,10%	6,62%	6,04%	4,85%	4,55%	63,47	63,56	63,80	63,88
	60	5	4,7	4,4	4,2	4,52%	3,93%	3,31%	2,89%	6,62%	5,75%	4,85%	4,23%	63,47	63,62	63,80	63,96
	95	4,9	4,5	4,1	4	4,32%	3,52%	2,68%	2,46%	6,33%	5,15%	3,92%	3,60%	63,51	63,74	64,05	64,15
	123	4,8	4,4	4	3,7	4,13%	3,31%	2,46%	1,79%	6,04%	4,85%	3,60%	2,63%	63,56	63,80	64,15	64,53
	159	4,7	4,2	3,8	3,4	3,93%	2,89%	2,02%	1,10%	5,75%	4,23%	2,96%	1,61%	63,62	63,96	64,38	65,21
	171	4,6	4,2	3,7	3,4	3,72%	2,89%	1,79%	1,10%	5,45%	4,23%	2,63%	1,61%	63,68	63,96	64,53	65,21

2. SOLO SILTOSO 1 (Amostra 3):

Valores de leitura do TDR, umidade gravimétrica, umidade volumétrica e sucção em função do tempo

Pressão de ar (kPa)	Tempo (min)	Leitura TDR				Umidade gravimétrica				Umidade volumétrica				Sucção (kPa)			
		z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm
0	0	30	27,3	26,3	27,2	47,59%	44,67%	43,56%	44,56%	55,67%	52,26%	50,95%	52,13%	1,83	2,36	2,55	2,38
	30	29,8	27,6	27,8	28,8	47,38%	45,01%	45,23%	46,31%	55,42%	52,65%	52,90%	54,17%	1,87	2,30	2,27	2,07
	60	29,8	27,5	27,8	28,9	47,38%	44,90%	45,23%	46,42%	55,42%	52,52%	52,90%	54,30%	1,87	2,32	2,27	2,05
	2420	30,1	27,7	28,1	29,5	47,70%	45,12%	45,55%	47,06%	55,80%	52,77%	53,29%	55,05%	1,81	2,29	2,21	1,93
	5250	30,2	27,6	28,4	29,7	47,80%	45,01%	45,88%	47,28%	55,92%	52,65%	53,67%	55,30%	1,79	2,30	2,15	1,89
	5432	30	27,7	28,1	29,5	47,59%	45,12%	45,55%	47,06%	55,67%	52,77%	53,29%	55,05%	1,83	2,29	2,21	1,93
29,43	0	29	27,6	28,5	29,7	46,53%	45,01%	45,99%	47,28%	54,43%	52,65%	53,80%	55,30%	31,46	31,73	31,56	31,32
	1	28,5	26,7	27,3	29,7	45,99%	44,01%	44,67%	47,28%	53,80%	51,48%	52,26%	55,30%	31,56	31,91	31,79	31,32
	4	28,5	26,4	26,1	29,5	45,99%	43,67%	43,33%	47,06%	53,80%	51,08%	50,69%	55,05%	31,56	31,96	32,02	31,36
	8	28,2	26,1	25,6	29	45,66%	43,33%	42,76%	46,53%	53,41%	50,69%	50,02%	54,43%	31,62	32,02	32,12	31,46
	15	27,9	25,7	25,1	28,5	45,34%	42,88%	42,19%	45,99%	53,03%	50,16%	49,35%	53,80%	31,68	32,10	32,22	31,56
	30	27,2	25,4	24,2	27,7	44,56%	42,53%	41,14%	45,12%	52,13%	49,75%	48,12%	52,77%	31,81	32,16	32,41	31,72
	45	26,7	25,1	23,6	26,9	44,01%	42,19%	40,43%	44,23%	51,48%	49,35%	47,29%	51,74%	31,91	32,22	32,54	31,87
	60	26,4	24,7	23,3	26,8	43,67%	41,73%	40,07%	44,12%	51,08%	48,81%	46,87%	51,61%	31,96	32,30	32,60	31,89
	75	26,2	24,6	23,1	26,3	43,44%	41,61%	39,83%	43,56%	50,82%	48,67%	46,59%	50,95%	32,00	32,32	32,65	31,98
	90	26	24,6	23	26,1	43,22%	41,61%	39,71%	43,33%	50,55%	48,67%	46,45%	50,69%	32,04	32,32	32,67	32,02
	105	25,9	24,5	22,8	26	43,10%	41,49%	39,47%	43,22%	50,42%	48,53%	46,17%	50,55%	32,06	32,34	32,72	32,04
	120	25,8	24,2	22,6	25,9	42,99%	41,14%	39,23%	43,10%	50,29%	48,12%	45,89%	50,42%	32,08	32,41	32,77	32,06
	135	25,5	24,1	22,7	26	42,65%	41,02%	39,35%	43,22%	49,89%	47,99%	46,03%	50,55%	32,14	32,43	32,74	32,04
	150	25,4	24,1	22,4	25,8	42,53%	41,02%	38,98%	42,99%	49,75%	47,99%	45,60%	50,29%	32,16	32,43	32,82	32,08
	165	25,4	24	22,3	25,6	42,53%	40,90%	38,86%	42,76%	49,75%	47,85%	45,46%	50,02%	32,16	32,45	32,84	32,12
	180	25,4	24	22,1	25,4	42,53%	40,90%	38,62%	42,53%	49,75%	47,85%	45,17%	49,75%	32,16	32,45	32,89	32,16
	195	25,1	23,8	22,1	25,4	42,19%	40,67%	38,62%	42,53%	49,35%	47,57%	45,17%	49,75%	32,22	32,49	32,89	32,16
	210	25,1	23,7	22,1	25,3	42,19%	40,55%	38,62%	42,42%	49,35%	47,43%	45,17%	49,62%	32,22	32,51	32,89	32,18
	225	25	23,7	22	25,2	42,07%	40,55%	38,49%	42,30%	49,21%	47,43%	45,03%	49,48%	32,24	32,51	32,92	32,20

Pressão de ar (kPa)	Tempo (min)	Leitura TDR				Umidade gravimétrica				Umidade volumétrica				Sucção (kPa)			
		z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm
	240	25	23,6	21,8	25,2	42,07%	40,43%	38,25%	42,30%	49,21%	47,29%	44,74%	49,48%	32,24	32,54	32,97	32,20
	255	24,9	23,6	21,8	25,2	41,96%	40,43%	38,25%	42,30%	49,08%	47,29%	44,74%	49,48%	32,26	32,54	32,97	32,20
	270	25	23,5	21,8	25,2	42,07%	40,31%	38,25%	42,30%	49,21%	47,15%	44,74%	49,48%	32,24	32,56	32,97	32,20
	285	24,8	23,4	21,8	25,2	41,84%	40,19%	38,25%	42,30%	48,94%	47,01%	44,74%	49,48%	32,28	32,58	32,97	32,20
	300	24,8	23,4	21,7	25,2	41,84%	40,19%	38,12%	42,30%	48,94%	47,01%	44,59%	49,48%	32,28	32,58	33,00	32,20
	316	25,3	23,9	22,1	25,6	42,42%	40,79%	38,62%	42,76%	49,62%	47,71%	45,17%	50,02%	32,18	32,47	32,89	32,12
	330	25,2	23,8	22	25,3	42,30%	40,67%	38,49%	42,42%	49,48%	47,57%	45,03%	49,62%	32,20	32,49	32,92	32,18
	346	25,1	23,7	21,8	25,3	42,19%	40,55%	38,25%	42,42%	49,35%	47,43%	44,74%	49,62%	32,22	32,51	32,97	32,18
	360	25	23,7	21,7	25,1	42,07%	40,55%	38,12%	42,19%	49,21%	47,43%	44,59%	49,35%	32,24	32,51	33,00	32,22
	376	24,9	23,6	21,6	25	41,96%	40,43%	38,00%	42,07%	49,08%	47,29%	44,45%	49,21%	32,26	32,54	33,03	32,24
	391	24,8	23,5	21,7	24,9	41,84%	40,31%	38,12%	41,96%	48,94%	47,15%	44,59%	49,08%	32,28	32,56	33,00	32,26
	405	24,7	23,4	21,6	25	41,73%	40,19%	38,00%	42,07%	48,81%	47,01%	44,45%	49,21%	32,30	32,58	33,03	32,24
	420	24,7	23,4	21,5	24,9	41,73%	40,19%	37,87%	41,96%	48,81%	47,01%	44,30%	49,08%	32,30	32,58	33,05	32,26
	435	24,7	23,5	21,5	24,9	41,73%	40,31%	37,87%	41,96%	48,81%	47,15%	44,30%	49,08%	32,30	32,56	33,05	32,26
	450	24,7	23,4	21,5	24,8	41,73%	40,19%	37,87%	41,84%	48,81%	47,01%	44,30%	48,94%	32,30	32,58	33,05	32,28
39,24	0	24,6	23,3	21,4	24,7	41,61%	40,07%	37,75%	41,73%	48,67%	46,87%	44,15%	48,81%	42,13	42,41	42,89	42,11
	2	24,5	23,3	21,4	24,6	41,49%	40,07%	37,75%	41,61%	48,53%	46,87%	44,15%	48,67%	42,15	42,41	42,89	42,13
	4	24,5	23,3	21,4	24,6	41,49%	40,07%	37,75%	41,61%	48,53%	46,87%	44,15%	48,67%	42,15	42,41	42,89	42,13
	8	24,5	23,4	21,4	24,6	41,49%	40,19%	37,75%	41,61%	48,53%	47,01%	44,15%	48,67%	42,15	42,39	42,89	42,13
	15	24,5	23,3	21,4	24,5	41,49%	40,07%	37,75%	41,49%	48,53%	46,87%	44,15%	48,53%	42,15	42,41	42,89	42,15
	30	24,4	23,1	21,3	24,4	41,37%	39,83%	37,62%	41,37%	48,40%	46,59%	44,01%	48,40%	42,17	42,46	42,92	42,17
	45	24,4	23,3	21,2	24,3	41,37%	40,07%	37,50%	41,26%	48,40%	46,87%	43,86%	48,26%	42,17	42,41	42,95	42,19
	60	24,3	23,2	21,1	24,1	41,26%	39,95%	37,37%	41,02%	48,26%	46,73%	43,71%	47,99%	42,19	42,44	42,98	42,24
	75	24,2	23,1	21,1	24,1	41,14%	39,83%	37,37%	41,02%	48,12%	46,59%	43,71%	47,99%	42,22	42,46	42,98	42,24
	90	24,2	22,9	21,1	24	41,14%	39,59%	37,37%	40,90%	48,12%	46,31%	43,71%	47,85%	42,22	42,51	42,98	42,26
	105	24,1	22,9	21	24	41,02%	39,59%	37,24%	40,90%	47,99%	46,31%	43,57%	47,85%	42,24	42,51	43,00	42,26
	120	24,1	22,9	21	23,9	41,02%	39,59%	37,24%	40,79%	47,99%	46,31%	43,57%	47,71%	42,24	42,51	43,00	42,28
	135	24	22,8	21	23,9	40,90%	39,47%	37,24%	40,79%	47,85%	46,17%	43,57%	47,71%	42,26	42,53	43,00	42,28
	150	23,8	22,8	20,9	23,9	40,67%	39,47%	37,12%	40,79%	47,57%	46,17%	43,42%	47,71%	42,30	42,53	43,03	42,28

Pressão de ar (kPa)	Tempo (min)	Leitura TDR				Umidade gravimétrica				Umidade volumétrica				Sucção (kPa)			
		z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm
	165	23,8	22,9	20,9	23,9	40,67%	39,59%	37,12%	40,79%	47,57%	46,31%	43,42%	47,71%	42,30	42,51	43,03	42,28
	180	23,8	22,8	20,8	23,8	40,67%	39,47%	36,99%	40,67%	47,57%	46,17%	43,27%	47,57%	42,30	42,53	43,06	42,30
	195	23,7	22,7	20,8	23,8	40,55%	39,35%	36,99%	40,67%	47,43%	46,03%	43,27%	47,57%	42,32	42,55	43,06	42,30
	210	23,6	22,8	20,8	23,8	40,43%	39,47%	36,99%	40,67%	47,29%	46,17%	43,27%	47,57%	42,35	42,53	43,06	42,30
	225	23,6	22,7	20,8	23,8	40,43%	39,35%	36,99%	40,67%	47,29%	46,03%	43,27%	47,57%	42,35	42,55	43,06	42,30
	240	23,6	22,7	20,7	23,7	40,43%	39,35%	36,86%	40,55%	47,29%	46,03%	43,12%	47,43%	42,35	42,55	43,10	42,32
	255	24,4	22,9	21,3	24,2	41,37%	39,59%	37,62%	41,14%	48,40%	46,31%	44,01%	48,12%	42,17	42,51	42,92	42,22
	270	24,2	23	21,2	24,1	41,14%	39,71%	37,50%	41,02%	48,12%	46,45%	43,86%	47,99%	42,22	42,48	42,95	42,24
	285	24,3	22,9	21,1	24,2	41,26%	39,59%	37,37%	41,14%	48,26%	46,31%	43,71%	48,12%	42,19	42,51	42,98	42,22
	300	24,1	22,8	21	24	41,02%	39,47%	37,24%	40,90%	47,99%	46,17%	43,57%	47,85%	42,24	42,53	43,00	42,26
	315	24,1	22,8	21	24	41,02%	39,47%	37,24%	40,90%	47,99%	46,17%	43,57%	47,85%	42,24	42,53	43,00	42,26
	330	24	22,9	21	24	40,90%	39,59%	37,24%	40,90%	47,85%	46,31%	43,57%	47,85%	42,26	42,51	43,00	42,26
	345	23,9	22,8	20,9	23,9	40,79%	39,47%	37,12%	40,79%	47,71%	46,17%	43,42%	47,71%	42,28	42,53	43,03	42,28
	360	23,7	22,7	20,9	23,9	40,55%	39,35%	37,12%	40,79%	47,43%	46,03%	43,42%	47,71%	42,32	42,55	43,03	42,28
	375	23,7	22,6	20,8	23,9	40,55%	39,23%	36,99%	40,79%	47,43%	45,89%	43,27%	47,71%	42,32	42,58	43,06	42,28
	390	23,6	22,7	20,8	23,9	40,43%	39,35%	36,99%	40,79%	47,29%	46,03%	43,27%	47,71%	42,35	42,55	43,06	42,28
	409	23,5	22,7	20,8	23,8	40,31%	39,35%	36,99%	40,67%	47,15%	46,03%	43,27%	47,57%	42,37	42,55	43,06	42,30
	420	23,4	22,7	20,7	23,8	40,19%	39,35%	36,86%	40,67%	47,01%	46,03%	43,12%	47,57%	42,39	42,55	43,10	42,30
	435	23,3	22,6	20,7	23,8	40,07%	39,23%	36,86%	40,67%	46,87%	45,89%	43,12%	47,57%	42,41	42,58	43,10	42,30
	450	23,9	22,6	21	24	40,79%	39,23%	37,24%	40,90%	47,71%	45,89%	43,57%	47,85%	42,28	42,58	43,00	42,26
	465	23,8	22,5	21	23,9	40,67%	39,11%	37,24%	40,79%	47,57%	45,74%	43,57%	47,71%	42,30	42,60	43,00	42,28
	480	23,8	22,5	20,9	23,9	40,67%	39,11%	37,12%	40,79%	47,57%	45,74%	43,42%	47,71%	42,30	42,60	43,03	42,28
	495	23,6	22,6	20,8	23,8	40,43%	39,23%	36,99%	40,67%	47,29%	45,89%	43,27%	47,57%	42,35	42,58	43,06	42,30
	510	23,5	22,4	20,8	23,8	40,31%	38,98%	36,99%	40,67%	47,15%	45,60%	43,27%	47,57%	42,37	42,63	43,06	42,30
	540	23,3	22,5	20,7	23,6	40,07%	39,11%	36,86%	40,43%	46,87%	45,74%	43,12%	47,29%	42,41	42,60	43,10	42,35
	555	23,2	22,4	20,7	23,7	39,95%	38,98%	36,86%	40,55%	46,73%	45,60%	43,12%	47,43%	42,44	42,63	43,10	42,32
	570	23,1	22,3	20,6	23,6	39,83%	38,86%	36,74%	40,43%	46,59%	45,46%	42,97%	47,29%	42,46	42,65	43,13	42,35
	585	23,1	22,3	20,6	23,6	39,83%	38,86%	36,74%	40,43%	46,59%	45,46%	42,97%	47,29%	42,46	42,65	43,13	42,35
	510	23,1	22,3	20,6	23,3	39,83%	38,86%	36,74%	40,07%	46,59%	45,46%	42,97%	46,87%	42,46	42,65	43,13	42,41

Pressão de ar (kPa)	Tempo (min)	Leitura TDR				Umidade gravimétrica				Umidade volumétrica				Sucção (kPa)			
		z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm
	617	22,8	22,2	20,6	23,2	39,47%	38,74%	36,74%	39,95%	46,17%	45,31%	42,97%	46,73%	42,53	42,68	43,13	42,44
	631	22,7	22,2	20,5	23,3	39,35%	38,74%	36,61%	40,07%	46,03%	45,31%	42,82%	46,87%	42,55	42,68	43,16	42,41
49,05	0	22,7	22,2	20,5	23,2	39,35%	38,74%	36,61%	39,95%	46,03%	45,31%	42,82%	46,73%	52,36	52,49	52,97	52,25
	2	22,6	22,2	20,5	23,2	39,23%	38,74%	36,61%	39,95%	45,89%	45,31%	42,82%	46,73%	52,39	52,49	52,97	52,25
	4	22,6	22,1	20,6	23,3	39,23%	38,62%	36,74%	40,07%	45,89%	45,17%	42,97%	46,87%	52,39	52,51	52,94	52,22
	8	22,7	22,1	20,4	23,2	39,35%	38,62%	36,48%	39,95%	46,03%	45,17%	42,67%	46,73%	52,36	52,51	53,00	52,25
	15	22,6	22,1	20,4	23,2	39,23%	38,62%	36,48%	39,95%	45,89%	45,17%	42,67%	46,73%	52,39	52,51	53,00	52,25
	30	22,6	22,1	20,4	23,1	39,23%	38,62%	36,48%	39,83%	45,89%	45,17%	42,67%	46,59%	52,39	52,51	53,00	52,27
	45	22,4	22	20,4	23,1	38,98%	38,49%	36,48%	39,83%	45,60%	45,03%	42,67%	46,59%	52,44	52,54	53,00	52,27
58,86	0	17,6	18	17,5	20,3	32,76%	33,31%	32,63%	36,35%	38,33%	38,97%	38,16%	42,52%	64,00	63,78	64,06	62,84
	3	17,6	17,9	17,5	20,4	32,76%	33,18%	32,63%	36,48%	38,33%	38,81%	38,16%	42,67%	64,00	63,84	64,06	62,81
	8	17,7	17,9	17,5	20,3	32,90%	33,18%	32,63%	36,35%	38,49%	38,81%	38,16%	42,52%	63,95	63,84	64,06	62,84
	15	17,6	17,9	17,5	20,3	32,76%	33,18%	32,63%	36,35%	38,33%	38,81%	38,16%	42,52%	64,00	63,84	64,06	62,84
	32	17,6	17,8	17,5	20,3	32,76%	33,04%	32,63%	36,35%	38,33%	38,65%	38,16%	42,52%	64,00	63,89	64,06	62,84
	60	17,4	17,7	17,3	20,3	32,49%	32,90%	32,35%	36,35%	38,00%	38,49%	37,84%	42,52%	64,13	63,95	64,19	62,84
	122	17	17,3	17,1	19,8	31,93%	32,35%	32,07%	35,71%	37,35%	37,84%	37,51%	41,77%	64,39	64,19	64,32	63,01
	180	16,7	17,1	16,6	19,5	31,51%	32,07%	31,37%	35,32%	36,86%	37,51%	36,69%	41,31%	64,61	64,32	64,69	63,12

3. SOLO SILTOSO 2:

Valores de leitura do TDR, umidade gravimétrica, umidade volumétrica e sucção em função do tempo

Pressão de ar (kPa)	Tempo (min)	Leitura TDR				Umidade gravimétrica				Umidade volumétrica				Sucção (kPa)			
		z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm
0	0	23,5	24,9	22,9	24,7	27,38%	28,78%	26,77%	28,58%	37,89%	39,82%	37,05%	39,55%	217,43	178,95	234,62	184,34
	75	23,4	25	22,9	24,6	27,28%	28,88%	26,77%	28,48%	37,75%	39,95%	37,05%	39,41%	220,26	176,26	234,62	187,05
	1103	23,5	24,7	22,7	24,7	27,38%	28,58%	26,57%	28,58%	37,89%	39,55%	36,76%	39,55%	217,43	184,34	240,48	184,34
98,1	0	23,5	24,8	23	24,3	27,38%	28,68%	26,88%	28,19%	37,89%	39,68%	37,19%	39,00%	315,53	279,74	329,82	293,32
	2	24,1	24,8	23	24,4	27,99%	28,68%	26,88%	28,29%	38,72%	39,68%	37,19%	39,14%	298,81	279,74	329,82	290,59
	4	23,9	24,9	23	24,4	27,79%	28,78%	26,88%	28,29%	38,45%	39,82%	37,19%	39,14%	304,34	277,05	329,82	290,59
	15	23,8	24,9	23,2	24,3	27,69%	28,78%	27,08%	28,19%	38,31%	39,82%	37,47%	39,00%	307,12	277,05	324,06	293,32
	1276	23,2	24,6	23,3	24,5	27,08%	28,48%	27,18%	28,38%	37,47%	39,41%	37,61%	39,27%	324,06	285,15	321,20	287,87
	1440	23,1	24,7	23,3	24,4	26,98%	28,58%	27,18%	28,29%	37,33%	39,55%	37,61%	39,14%	326,93	282,44	321,20	290,59
	1380	23,3	24,8	23,4	24,6	27,18%	28,68%	27,28%	28,48%	37,61%	39,68%	37,75%	39,41%	321,20	279,74	318,36	285,15
	4300	23,2	24,6	23,1	24,6	27,08%	28,48%	26,98%	28,48%	37,47%	39,41%	37,33%	39,41%	324,06	285,15	326,93	285,15
	5650	23,2	24,8	22,9	24,5	27,08%	28,68%	26,77%	28,38%	37,47%	39,68%	37,05%	39,27%	324,06	279,74	332,72	287,87
	7080	23,2	24,7	22,8	24,4	27,08%	28,58%	26,67%	28,29%	37,47%	39,55%	36,90%	39,14%	324,06	282,44	335,64	290,59
	8525	23	24,5	23,1	24,2	26,88%	28,38%	26,98%	28,09%	37,19%	39,27%	37,33%	38,86%	329,82	287,87	326,93	296,06
196,2	0	22,9	24,5	23	24,2	26,77%	28,38%	26,88%	28,09%	37,05%	39,27%	37,19%	38,86%	430,82	385,97	427,92	394,16
	2	22,8	24,3	23	24,2	26,67%	28,19%	26,88%	28,09%	36,90%	39,00%	37,19%	38,86%	433,74	391,42	427,92	394,16
	4	23	24,2	23,1	24,3	26,88%	28,09%	26,98%	28,19%	37,19%	38,86%	37,33%	39,00%	427,92	394,16	425,03	391,42
	8	22,7	24,2	23,1	24,2	26,57%	28,09%	26,98%	28,09%	36,76%	38,86%	37,33%	38,86%	436,68	394,16	425,03	394,16
	15	22,7	24,1	23,1	24,2	26,57%	27,99%	26,98%	28,09%	36,76%	38,72%	37,33%	38,86%	436,68	396,91	425,03	394,16
	30	22,6	24,1	23,2	24,2	26,47%	27,99%	27,08%	28,09%	36,62%	38,72%	37,47%	38,86%	439,64	396,91	422,16	394,16
	45	22,7	24	23,3	24,3	26,57%	27,89%	27,18%	28,19%	36,76%	38,58%	37,61%	39,00%	436,68	399,67	419,30	391,42
	1351	22,1	22,8	21,9	24,4	25,95%	26,67%	25,74%	28,29%	35,90%	36,90%	35,61%	39,14%	454,69	433,74	460,85	388,69
	1440	21,9	22,8	21,9	24,3	25,74%	26,67%	25,74%	28,19%	35,61%	36,90%	35,61%	39,00%	460,85	433,74	460,85	391,42
	1551	21,9	22,7	21,8	24,2	25,74%	26,57%	25,64%	28,09%	35,61%	36,76%	35,47%	38,86%	460,85	436,68	463,97	394,16
	2790	21,7	22,7	21,6	24,3	25,53%	26,57%	25,43%	28,19%	35,32%	36,76%	35,18%	39,00%	467,11	436,68	470,27	391,42

Pressão de ar (kPa)	Tempo (min)	Leitura TDR				Umidade gravimétrica				Umidade volumétrica				Sucção (kPa)			
		z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm
	2960	21,7	22,5	21,5	24,3	25,53%	26,36%	25,32%	28,19%	35,32%	36,48%	35,03%	39,00%	467,11	442,61	473,45	391,42
	4220	21,6	22,4	21,5	24,1	25,43%	26,26%	25,32%	27,99%	35,18%	36,33%	35,03%	38,72%	470,27	445,60	473,45	396,91
	5700	21,6	22,3	21,3	24,1	25,43%	26,16%	25,11%	27,99%	35,18%	36,19%	34,74%	38,72%	470,27	448,61	479,90	396,91
	5760	21,6	22,3	21,4	24,1	25,43%	26,16%	25,21%	27,99%	35,18%	36,19%	34,89%	38,72%	470,27	448,61	476,66	396,91
245,25	0	21,6	22,3	21,4	24,1	25,43%	26,16%	25,21%	27,99%	35,18%	36,19%	34,89%	38,72%	519,32	497,66	525,71	445,96
	1	21,6	21,9	21,4	24,1	25,43%	25,74%	25,21%	27,99%	35,18%	35,61%	34,89%	38,72%	519,32	509,90	525,71	445,96
	4	21,6	21,9	21,4	24,2	25,43%	25,74%	25,21%	28,09%	35,18%	35,61%	34,89%	38,86%	519,32	509,90	525,71	443,21
	8	21,6	21,7	21,4	24,3	25,43%	25,53%	25,21%	28,19%	35,18%	35,32%	34,89%	39,00%	519,32	516,16	525,71	440,47
	15	21,6	21,7	21,3	24,3	25,43%	25,53%	25,11%	28,19%	35,18%	35,32%	34,74%	39,00%	519,32	516,16	528,95	440,47
	30	21,5	21,7	21,3	24,2	25,32%	25,53%	25,11%	28,09%	35,03%	35,32%	34,74%	38,86%	522,50	516,16	528,95	443,21
	45	21,6	21,7	21,1	24,2	25,43%	25,53%	24,90%	28,09%	35,18%	35,32%	34,45%	38,86%	519,32	516,16	535,49	443,21
	60	21,6	21,6	21,1	24,2	25,43%	25,43%	24,90%	28,09%	35,18%	35,18%	34,45%	38,86%	519,32	519,32	535,49	443,21
	95	21,5	21,5	20,8	24,3	25,32%	25,32%	24,57%	28,19%	35,03%	35,03%	34,00%	39,00%	522,50	522,50	545,52	440,47
	123	21,6	21,6	20,8	24,3	25,43%	25,43%	24,57%	28,19%	35,18%	35,18%	34,00%	39,00%	519,32	519,32	545,52	440,47
	155	21,6	21,5	20,6	24,2	25,43%	25,32%	24,36%	28,09%	35,18%	35,03%	33,70%	38,86%	519,32	522,50	552,35	443,21
	1440	21,2	19,9	18,4	24,2	25,00%	23,60%	21,92%	28,09%	34,59%	32,65%	30,33%	38,86%	532,21	577,28	637,17	443,21
	1500	21,2	19,9	18,5	24,1	25,00%	23,60%	22,03%	27,99%	34,59%	32,65%	30,48%	38,72%	532,21	577,28	632,85	445,96
	2865	21	19,7	18,3	23,6	24,79%	23,38%	21,80%	27,49%	34,30%	32,34%	30,17%	38,03%	538,81	584,71	641,54	459,86
	4350	21	19,6	18,2	22,5	24,79%	23,27%	21,69%	26,36%	34,30%	32,19%	30,01%	36,48%	538,81	588,49	645,96	491,66
294,3	5675	20,9	19,3	17,9	21,8	24,68%	22,93%	21,34%	25,64%	34,15%	31,73%	29,53%	35,47%	542,15	600,06	659,58	513,02
	0	20,9	19,2	17,9	21,5	24,68%	22,82%	21,34%	25,32%	34,15%	31,58%	29,53%	35,03%	591,20	653,05	708,63	571,55
	2	20,9	19,3	17,8	21,5	24,68%	22,93%	21,23%	25,32%	34,15%	31,73%	29,37%	35,03%	591,20	649,11	713,28	571,55
	4	20,8	19,1	17,8	21,5	24,57%	22,71%	21,23%	25,32%	34,00%	31,42%	29,37%	35,03%	594,57	657,03	713,28	571,55
	8	20,9	19,2	17,8	21,5	24,68%	22,82%	21,23%	25,32%	34,15%	31,58%	29,37%	35,03%	591,20	653,05	713,28	571,55
	16	20,8	19,2	17,7	21,3	24,57%	22,82%	21,11%	25,11%	34,00%	31,58%	29,21%	34,74%	594,57	653,05	718,00	578,00
	30	20,8	19,2	17,6	21,3	24,57%	22,82%	21,00%	25,11%	34,00%	31,58%	29,05%	34,74%	594,57	653,05	722,78	578,00
	153	20,8	19	17,6	21,1	24,57%	22,60%	21,00%	24,90%	34,00%	31,27%	29,05%	34,45%	594,57	661,06	722,78	584,54
	1440	20,2	19	17,1	20,2	23,93%	22,60%	20,41%	23,93%	33,10%	31,27%	28,24%	33,10%	615,44	661,06	747,68	615,44

Pressão de ar (kPa)	Tempo (min)	Leitura TDR				Umidade gravimétrica				Umidade volumétrica				Sucção (kPa)			
		z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm	z=2,5 cm	z=7,5 cm	z=12,5 cm	z=17,5 cm
	1610	20,1	18,1	16,9	20	23,82%	21,57%	20,17%	23,71%	32,95%	29,85%	27,91%	32,80%	619,04	699,49	758,14	622,66
	2900	19,2	16,5	15,5	18,9	22,82%	19,69%	18,47%	22,49%	31,58%	27,24%	25,55%	31,11%	653,05	780,02	841,15	665,13